

IB 131-2015/72

**Entwicklung und Umsetzung eines Konzeptes
zur Bedruckung einer formvariablen
Röhrenstruktur**

Alfred Tempel

Betreuer: Benjamin Gramüller



**Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik
Braunschweig**

Oktober / 2014

IB 131-2015/72

**Entwicklung und Umsetzung eines Konzeptes zur
Bedruckung einer formvariablen Röhrenstruktur**

Braunschweig, Oktober, 2014

Der Bericht umfasst:

90 Seiten


Institutsleiter:

Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann

Verfasser:


Leiter der Abteilung:

Prof. Dr.-Ing. C. Hühne


Alfred Tempel

HOCHSCHULE FÜR TECHNIK, WIRTSCHAFT UND KULTUR LEIPZIG

FAKULTÄT MASCHINENBAU UND ENERGIETECHNIK

MASTER-STUDIENGANG MASCHINENBAU

Masterarbeit

Entwicklung und Umsetzung eines Konzeptes zur Bedruckung einer formvariablen Röhrenstruktur

Masterarbeit Nr. 183/13

von

Alfred Tempel

geb. am 25.09.1986

in Leipzig

(Matrikelnummer 57623)

Betreuer im Unternehmen:

Dipl.-Ing. Benjamin Gramüller

(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
e.V., Braunschweig)

Verantw. Hochschullehrer:

Prof. Dr.-Ing. Eckard Scholz, HTWK Leipzig

Dr. Bob Bailey, University of Paisley

Braunschweig, 06.10.2014

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unzulässige, fremde Hilfe angefertigt zu haben. Die verwendeten Quellen und Hilfsmittel sind im Literaturverzeichnis vollständig aufgeführt. Weiterhin versichere ich, dass ich diese Arbeit noch keinem anderen Prüfungsgremium vorgelegt habe.

Braunschweig, den 06.10.2014

Alfred Tempel

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung und Umsetzung eines Konzeptes zur Bedruckung formvariabler Röhrenstrukturen. Verschiedene theoretische Ansätze zum Verschluss der bereits vorhandenen, druckaktuierten Zellen werden verglichen und gemäß ihrer Fähigkeit, der Zellbewegung zu folgen, bewertet. Die favorisierte Lösung besteht in einer die Verformung unterstützenden Endkappe. Diese wird mittels nichtlinearer FE-Berechnungen dimensioniert, wobei eine Formfindung entgegen der späteren Bewegung unter Last ausgehend vom idealisierten Belastungszustand hin zu einer Fertigungskonfiguration stattfindet. Annahmen zu geometrischen Beziehungen und erwartetem Materialverhalten werden analytisch begründet und innerhalb der Simulation verifiziert. Dabei bestätigen die numerischen Ergebnisse das Konzept zur Formfindung und Dimensionierung.

Als Resultat entsteht eine Kappenform, die den vorgegebenen Arbeitsdruck von 1 MPa aufnimmt und in Bewegungsenergie zur gezielten Unterstützung der Zellverformung bis zu einem Flankenwinkel von 9° nutzt.

Abstract

The work at hand deals with the development and realization of a pressurizing concept for morphing tubular structures. Different theoretical approaches for sealing the already existing, pressure actuated cells are being compared. An evaluation is done referring to their ability of allowing cell movement. The favoured solution consists of a deformation supportive end cap, which is dimensioned through non-linear FE-Analysis. The form finding process is oriented beginning from an idealized working stage towards the manufacturing configuration and therefore it is contrary to later movement under loading. Assumptions concerning geometric relations and predicted material behaviour are analytically justified and verified within the simulation. The gained numerical results prove the developed concept of form finding and dimensioning.

In conclusion a cap geometry is generated which is able to sustain the applied pressure of 1 MPa and furthermore use it to support the cell's movement up to an angle of 9° .

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Formelzeichenverzeichnis	V
1 Introduction	6
1 Einleitung	8
2 Prinzip der Zellen	10
3 Vorbetrachtung	13
3.1 Anforderungsanalyse	13
3.2 Konzeptentwicklung	15
3.3 Bewertung	18
3.4 Umsetzung	20
3.4.1 Theoretischer Hintergrund	21
3.4.2 Numerisches Vorgehen	24
4 DSEC-Strategie	26
4.1 Basismodell	27
4.1.1 Geometrie	27
4.1.2 Vernetzung	29
4.1.3 Initialbelastung	30
4.1.4 Kontaktbedingungen	31
4.1.5 Der UPCOORD-Befehl	33
4.2 Formfindung	34
4.2.1 Bedruckungsprozess	34
4.2.2 Isotensoid	36
4.2.3 Zellverformung	38
5 Simulation	41
5.1 Elementgröße und Konvergenzstudie	41
5.2 Optimierungspotenzial	45
5.2.1 Elementtypen	45
5.2.2 Halbes Modell	46
5.2.3 Selektive und verzögerte Kontaktdefinition	46

5.3	Test der Kappe	47
5.4	Übertragung in CAD-Format	49
6	Ergebnisse	50
6.1	Wandstärke und Material	50
6.2	Referenzkappe	52
6.3	Vergleich unterschiedlicher Kappenhöhen	56
6.4	Vergleich mit alternativen Konzepten	58
6.5	Fazit	60
7	Zusammenfassung und Ausblick	61
7	Conclusions	62
	Literaturverzeichnis	IV
	Anhang	VI
A1	Schematischer Ablauf der Gesamtsimulation	VI
A2	Schematischer Ablauf der Bedruckung	VII
B1	Ergebnisse Kappentest (Studie)	VIII
B2	Ergebnisse Kappentest (Referenz unterhalb 0,1 MPa)	XI
C1	Quellcode (A_C_INIT.mac)	XII
C2	Quellcode (A1_C_GEO.mac)	XV
C3	Quellcode (A2_C_MESH.mac)	XVI
C4	Quellcode (A3_LBC_PRESTRESS.mac)	XVII
C5	Quellcode (LBC1_TPRES.mac)	XVIII
C6	Quellcode (A4_CONTACT.mac)	XVIII
C7	Quellcode (A5_P_AFTER_IT.mac)	XIX
C8.1	Quellcode (B_ISOT.mac)	XX
C8.2	Quellcode (B_ISOT_IT.mac)	XXI
C9	Quellcode (C_DSEC.mac)	XXII
C10	Quellcode (LBC3_DSEC.mac)	XXIII
C11	Quellcode (D_TESTCELL.mac)	XXIV
C12	Quellcode (LBC4_TESTCELL.mac)	XXV
C13	Quellcode (GET_MOMENT.mac)	XXVI
D	Datenblätter Elastollan 1195 A aus [12]	XXVIII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Wirkprinzip der Formänderung bei pflanzlichen Zellen [2, S. 3]	9
Abbildung 2.1: Ausgangs- (links) und Endkonfiguration (rechts) der Zellen	10
Abbildung 2.2: Mögliche Zellgeometrie und –anordnung...	11
Abbildung 2.3: Abmessungen und Benennung der erarbeiteten Zellen	12
Abbildung 2.4: Geometrie der GFK- (links) und Polyamid-Zellen (rechts)	12
Abbildung 3.1: Kappengeometrien mit Aussparungen, welche durch Membran oder Schlauch gedichtet werden können (rot)	16
Abbildung 3.2: mögliche Geometrien für Materialverbund- und DSEC-Kappe	16
Abbildung 3.3: Übersicht der Konzepte und Lösungsansätze	17
Abbildung 3.4: Konzept zur Entwicklung der unbekannten Einbauform der Kappe	20
Abbildung 3.5: Unterschiedliche Zustände einer ebenen Membran bei Bedruckung	22
Abbildung 3.6: Zelle in Konvergenz mit Innenkreisen	22
Abbildung 3.7: Ablauf der Simulation	24
Abbildung 4.1: Unterteilung und Einzelschritte der Simulation	26
Abbildung 4.2: schematische Darstellung der unterlegten Balkenkonstruktion (links), umgebenden Schalenstruktur (Mitte) und ebenen Verschlussmembran (rechts)	28
Abbildung 4.3: Beispiel zur Degeneration der Elementform [6, S. 120]	29
Abbildung 4.4: Vernetzung von Zelle (links) und Membran (rechts)	30
Abbildung 4.5: Kontaktsituation im Laufe der Bedruckung	32
Abbildung 4.6: Ablauf des Bedruckungsalgorithmus	35
Abbildung 4.7: Spannungsverlauf der Kappe vor Einsetzen des Isotensoid-Algorithmus‘	36

Abbildung 4.8: Einfluss des Isotensoid-Algorithmus auf Spannungsdifferenz	37
Abbildung 4.9: Kappengeometrien in Abhängigkeit von Sollhöhe und Wandstärke	40
Abbildung 5.1: Rechenzeit und Abweichung der Simulation	44
Abbildung 5.2: Ablauf für CAD-Export des deformierten Netzes	49
Abbildung 6.1: Darstellung entscheidender Faktoren in Abhängigkeit der Dicke	51
Abbildung 6.2: durch die Kappe abgegebenes Drehmoment ($t = 1 \text{ mm}$, $p = 0,1 \text{ MPa}$)	53
Abbildung 6.3: durch die Kappe abgegebenes Drehmoment ($E\text{-Modul} = 200 \text{ MPa}$, $p = 0,1 \text{ MPa}$)	54
Abbildung 6.4: durch die Kappe abgegebenes Drehmoment ($E\text{-Modul} = 50 \text{ MPa}$; $t = 1 \text{ mm}$)	55
Abbildung 6.5: Konvergenzkurve für DSEC-Kappe und GFK-Zelle]	56
Abbildung 6.6: Kappengeometrien für Sollhöhen von 20 mm, 25 mm und 30 mm	56
Abbildung 6.7: Momentkurven für Kappen mit 20 mm, 25 mm und 30 mm	57
Abbildung 6.8: Geometrien der Konzepte DSEC, Isotensoid-Kappe und Verguss	58
Abbildung 6.9: Momentkurven für die Konzepte DSEC, Isotensoid-Kappe und Verguss	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Anforderungen an potenzielles Verschlusskonzept	14
Tabelle 3.2: Bewertungsmatrix der verschiedenen Lösungsansätze	19
Tabelle 5.1: Ergebnisse der numerischen Rechnung und Abweichung...	43
Tabelle 5.2: benötigte Rechenzeit der Simulation	44

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
A	mm^2	Fläche
b	mm	Breite
d	mm	Durchmesser
E	MPa	Elastizitätsmodul
I	mm^4	Flächenträgheitsmoment
F	N	Kraft
h	mm	Höhe
p	MPa	Druck
t	mm	Wandstärke / Dicke
σ	N/mm^2	Spannung

1 Introduction

The development and form finding of a component complies with its designated task and function. The decision on a geometry however limits the construction's ability to react to changing demands or varying loads. As an answer to dynamic and variable requirements solutions with equally flexible geometry are needed.

The flap systems of modern commercial aircraft can be seen as an example. These allow variation of the effective surface by adjustment of the front and rear wing edges. By that, maximum lift at relatively slow movement during take off and landing can be provided. In contrast a more streamlined wing profile is preferred when maintaining cruise speed. [1]

Gaps, rivets and mechanisms necessary for this modification prevent the airflow from staying laminar. A state critical for efficiency and fuel saving. In military application surfaces without disruptions are also essential for minimization of the radar cross section. Therefore up to date flap systems form a very complex, hard to maintain and heavy-weight compromise to fulfill several working states with contradictory requirements to the construction. From that, unwanted effects arise when changing between one configuration and another, leading to disadvantages within the separate situations. Hence, designing a flexible yet continuous surface to improve aerodynamic capabilities is of highest interest to aviation research. Described as morphing or adaptive wing deliberations concerning the adjustment of the wing geometry with continuous surface where made already in 1916 to examine the possibility of smooth changing between different configurations [1, p. 1 ff.]. In recent past the use of shape-memory alloys, piezo-electrics and other multi-functional materials allowed reduction of the necessary mechanisms. These solutions suffer from the disadvantage of flexible areas also being structural elements. Thus every deformation needs to overcome the inherent rigidity of the structure. Consequently the desired elasticity limits the overall rigidity of the construction and its bearable load.

Present research at the German Aerospace Center (DLR) examines tubular structures which are free of this dilemma. Being pressurized they first are able to undergo huge deformations and after reaching a convergence state increase of pres-

sure results in stiffening of the structure. Similar effects can be observed in plants like mimosa or Venus flytrap which perform movement by filling selected cells [2]. The process is shown symbolized in Figure 1.1.

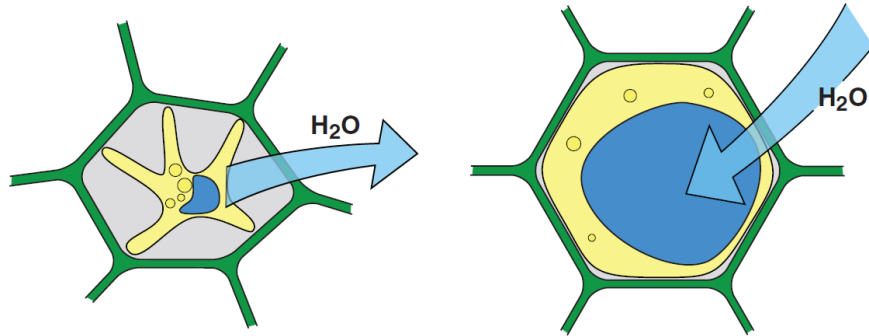


Figure 1.1: working principle of shape changing biological cells [2, p. 3]

A principle like this allows the development of morphing structures as integral parts to realize multi-functional components. Possible usage is not limited to aviation and aerospace but offers huge potential ranging from automotive to mainly every engineering discipline as well as all-day application. It opens up new approaches in the design of constructions that are capable of fulfilling more than one function or purpose in an ideal manner.

The following work examines several concepts of pressurization of the described cellular structures. Different approaches are being compared and evaluated. The main goal is the development of a system, able to withstand the predicted loads while allowing the movement of the pressure actuated cells.

1 Einleitung

Die Entwicklung und Formfindung von Bauteilen richtet sich nach ihrer Aufgabe und der zu erfüllenden Funktion. Die Festlegung einer Geometrie beschränkt jedoch die Möglichkeit einer Konstruktion, auf wechselnde Bedürfnisse oder veränderliche Belastung zu reagieren. Als Antwort auf dynamische und variable Anforderungsprofile sind Lösungen mit ebenso flexibler Geometrie erforderlich.

Beispielhaft seien dazu Klappensysteme moderner Verkehrsflugzeuge genannt. Diese können durch Verstellung von Flügelvorder- und -hinterkante die effektive Fläche variieren, um maximalen Auftrieb bei vergleichsweise langsamer Bewegung während Start und Landeanflug zu gewähren. Für die Reisegeschwindigkeit ist dagegen ein stromlinienförmiges Profil mit geringerem Luftwiderstand wünschenswert. [1]

Für die Verstellung nötige Spalte, Niete und Mechanismen verhindern eine für Kraftstoffersparnis und Effizienz kritische Laminarerhaltung der Luftströmung. Im militärischen Sektor sind Oberflächen frei von Unterbrechungen außerdem für die Minimierung der Radarsignatur essentiell. Bisherige Hochauftriebssysteme stellen daher eine komplexe, wartungsintensive und stark massebehaftete Kompromisslösungen zur Erfüllung mehrerer Betriebszustände mit widersprüchlichen Anforderungen an die Konstruktion dar. Daraus entstehen unerwünschte Effekte beim Wechsel zwischen den Konfigurationen und kaum zu optimierende Nachteile innerhalb der Einzelzustände. Die Gestaltung einer flexiblen und dennoch kontinuierlichen Oberfläche zur Steigerung der aerodynamischen Leistungsfähigkeit ist deshalb für die Luftfahrt von größtem Interesse. Unter der Bezeichnung formvariabler oder adaptiver Flügel (morphing wing) wurden bereits seit 1916 Überlegungen zur „Anpassung der Flügelgeometrie mit einer kontinuierlichen Profiloberfläche“ und einem möglichst flüssigen Wechsel zwischen verschiedenen Konfigurationen erarbeitet [1, S. 1 ff.]. In jüngerer Vergangenheit konnte durch den Einsatz von Formgedächtnislegierungen, Piezoelektrika und anderer multifunktionaler Materialien eine Verringerung der nötigen Mechanismen realisiert werden. Diese Ansätze sind mit dem Nachteil behaftet, dass flexible Bereiche auch gleichzeitig tragende Elemente bilden. Auf dieser Grundlage muss für jedwede Verformung die Eigensteifigkeit der

Struktur überwunden werden. Daraus resultierend, limitiert die erwünschte Elastizität die Gesamtsteifigkeit der Konstruktion und die ertragbare Belastung.

Aktuell untersucht das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) Röhrenstrukturen, welche aufgrund ihrer geometrischen Beschaffenheit nicht diesem Dilemma unterworfen sind. Unter Druckbelastung sind diese erst zu erheblicher Verformung und nach Erreichen der Zielkonfiguration bei weiterer Drucksteigerung auch zu einer Versteifung in der Lage. Ähnliche Effekte sind in der Natur beispielsweise bei Pflanzen wie der Mimose oder Venusfliegenfalle zu beobachten, welche durch das selektive Füllen ihrer Zellen eine Bewegung erreichen [2]. Der Vorgang ist in Abbildung 1.1 symbolisch dargestellt.

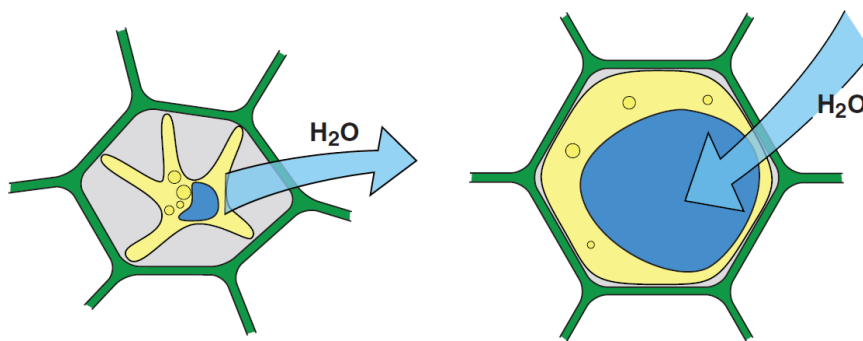


Abbildung 1.1: Wirkprinzip der Formänderung bei pflanzlichen Zellen [2, S. 3]

Ein derartiges Prinzip erlaubt die Entwicklung von formvariablen Strukturen in Integralbauweise zur Realisierung multifunktionaler Bauteile. Mögliche Verwendungen beschränken sich dabei nicht auf den Einsatz in der Luft- und Raumfahrt, sondern bieten enormes Potenzial, angefangen bei der Fahrzeugindustrie, über nahezu alle Ingenieurgebiete bis hin zur alltäglichen Anwendung. Es eröffnen sich neue Wege der Gestaltung von Konstruktionen, die mehr als nur eine Funktion oder einen Betriebszustand ideal erfüllen können.

Die folgende Arbeit untersucht verschiedene Konzepte für eine Bedruckung derartiger Zellstrukturen und vergleicht unterschiedliche Ansätze. Ziel ist die Entwicklung eines Systems, das parallel zur Aufnahme der erwarteten Lasten die Bewegung der druckaktuierten Zellen ermöglicht.

2 Prinzip der Zellen

Theoretische Lösungen formvariabler Zellen, basierend auf dem zuvor beschriebenen, der Natur entlehnten Ansatz, sind durch Pagitz et al. [2] entwickelt. Wird eine beliebige, zweidimensionale Vieleckgeometrie, bestehend aus verhältnismäßig steifen Flanken verbunden über Gelenke, durch Innendruck belastet, strebt sie zur Erreichung des energetisch günstigeren Zustandes eine Maximierung der umschlossenen Fläche an. Resultierend entsteht eine Struktur, bei welcher alle Gelenkpunkte einen Kreis beschreiben und sich die Flanken als Sehnen dazu darstellen. Unter der Bedingung mechanisch idealer Gelenke ist das Prinzip auch für sehr kleine Differenzen zwischen Innen- und Außendruck funktionsfähig. Das Maß der zu erreichenden Verformung hängt dabei allein von der Konfiguration der Startgeometrie ab. Je stärker die Form der Zellen im unbedruckten Zustand von der eines Kreises abweicht, desto größer ist das Potenzial. Abbildung 2.1 zeigt Ausgangs- und Endform einer derartigen Struktur.

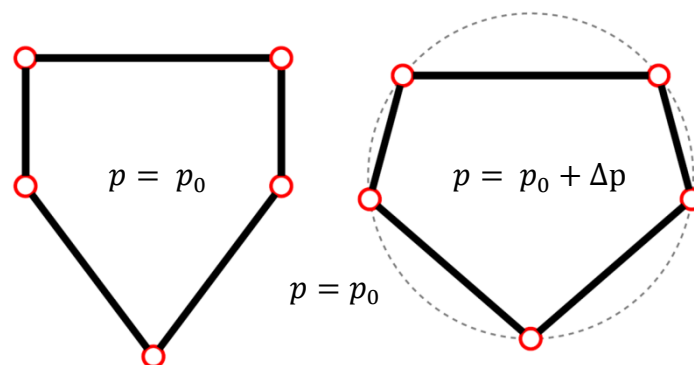


Abbildung 2.1: Ausgangs- (links) und Endkonfiguration (rechts) der Zellen

Bei realen Gelenken definiert deren Reststeifigkeit die minimal nötige Druckdifferenz zum Initiieren der Bewegung. Ist die Gelenksteifigkeit über der zu durchlaufenden Gesamtverformung nicht konstant und steigt beispielsweise mit zunehmender Dehnung des Materials, so nimmt die Geometrie für steigende Werte des Innendrucks jeweils eine entsprechend andere Form an und konvergiert letztendlich gegen die in Abbildung 2.1 rechts dargestellte Endkonfiguration. Wird der Innendruck danach weiter erhöht, findet keine Formänderung der Zellen statt, da die umschlossene Fläche ihr Maximum erreicht hat.

Stattdessen kommt es zur Versteifung der Struktur, welche zur Aufnahme äußerer Lasten genutzt werden kann. Dieser Zustand hält an, bis die Drucklast ausreicht,

entweder die Flanken selbst zu verformen, wodurch auch diese auf eine Kreisform streben oder aber die Gelenke überbeansprucht werden und versagen. Beide Fälle begrenzen das Prinzip der vorgestellten Zellen. Die beschriebenen Zusammenhänge werden von Pagitz et al. genutzt, um bewegliche Strukturen, bestehend aus ebenen Kombinationen verschieden geformter Zellen, mathematisch auszulegen und Aussagen zu realisierbarer Verformung sowie ertragbarer Last zu treffen.

Dabei werden benachbarte Zellen durch die ihnen gemeinsamen Flanken verbunden. Für einen einreihigen Kragarm addieren sich die Winkeländerungen der Einzelzellen zur Verformung der Gesamtstruktur. Eine mögliche doppelreihige Lösung, wie in Abbildung 2.2 a) dargestellt, erlaubt die gesteuerte Bewegung in zwei Richtungen und eine komplexe Anordnung ähnlich Abbildung 2.2 b) lässt sich zwischen verschiedensten Formen stufenlos variieren. Die Vielfalt der erzeugbaren Geometrie wird nur durch die Möglichkeit einer separaten Ansteuerung einzelner Zellen begrenzt.

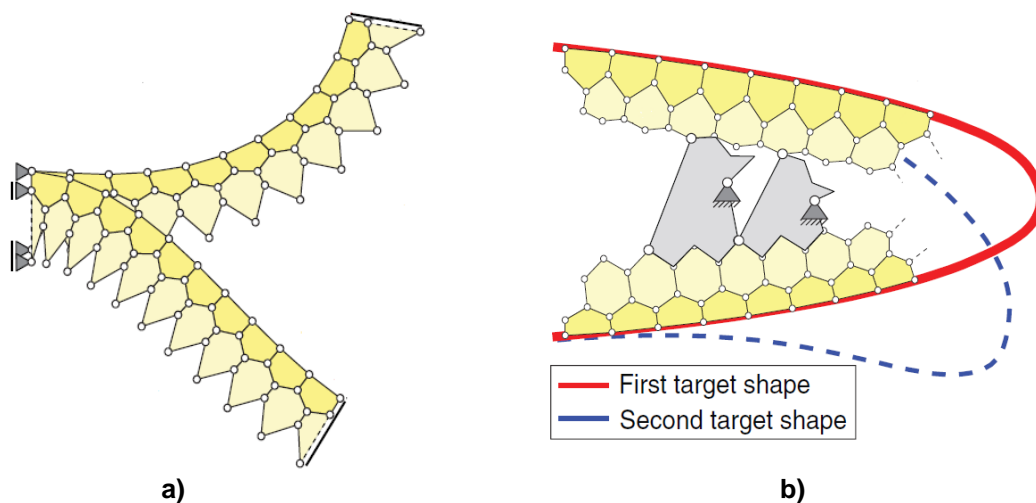


Abbildung 2.2: Mögliche Zellgeometrie und -anordnung für zweireihigen Kragarm (a) und Flügelvorderkante (b) nach [2, S. 6 ff.]

Eine erste funktionsfähige Umsetzung dieses Konzepts ist am DLR seit 2013 durch die Arbeiten von Gramüller et al. [3] und Boblenz [4] realisiert. Die entstandenen Zellen aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) nutzen Festkörpergelenke basierend auf lokaler Wandstärkenreduktion. Die Vorzüge einer derartigen Lösung gegenüber mechanischen Drehgelenken liegen hauptsächlich in Dichtigkeit sowie geringer Komplexität und können detailliert in [4] nachvollzogen werden. Abbildung 2.3 verdeutlicht die groben Abmessungen der fertigen Zellen.

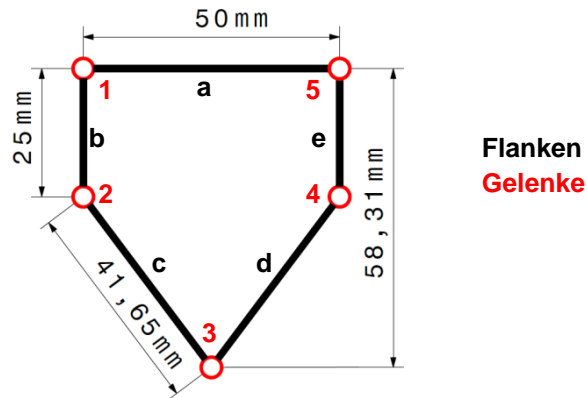


Abbildung 2.3: Abmessungen und Benennung der erarbeiteten Zellen nach [4, S. 40]

Alternativ zur komplizierten und schwer reproduzierbaren Fertigung der GFK-Zellen erarbeitet Gramüller tangentialstetige Zellen aus dem Werkstoff Polyamid 12. Dieser erlaubt eine Produktion mehrreihiger Kombinationen ähnlich Abbildung 2.2 aus ebenen Segmenten im Wasserstrahlverfahren und vereinfacht auf diese Weise die Herstellung identischer Systeme erheblich. Abbildung 2.4 stellt die Geometrien beider Ansätze gegenüber. Eine Bedruckung erfolgt bisher mittels zusätzlich eingelegtem und an den Endstücken gedichtetem Elastomerschlauch. Der entstandene Demonstrator ist bis zu einem Innendruck von 0,3 MPa [4, S. 47] voll funktionsfähig und erreicht Flankenverdrehungen bis zu $12,2^\circ$ [4, S. 53].

Dabei verhindert die Eigensteifigkeit des verwendeten Elastomers ein vollständiges Anschmiegen des Schlauches in den kleinwinkligen Gelenkbereichen der Zellen, wodurch nicht das volle Potenzial der Struktur genutzt werden kann. Die Weiterentwicklung der formvariablen Zellen hin zu höherem Maximaldruck und besserem Wirkungsgrad erfordert eine Überarbeitung des Bedruckungssystems, um eine gleichmäßige Lastverteilung auf die Zellinnenflächen zu gewährleisten.

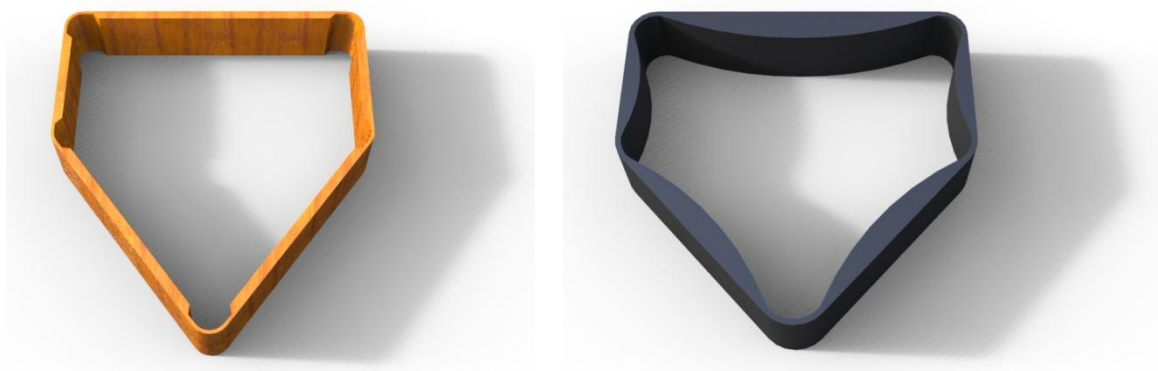


Abbildung 2.4: Geometrie der GFK- (links) und Polyamid-Zellen (rechts)

3 Vorbetrachtung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Bedruckungskonzeptes der beschriebenen formvariabler Röhrenstrukturen ähnlich Abbildung 2.4. Die zugrundeliegende Querschnittsgeometrie ist mit den in Abbildung 2.3 dargestellten Dimensionen definiert. Der Zieldruck wird mit 1 MPa , die daraus resultierende Zellbewegung durch eine Winkeländerung von jeweils 10° an den Gelenken 1 und 5 vorgegeben.

3.1 Anforderungsanalyse

Ein potenzieller Verschluss der Zellen muss mehreren, teils gegenläufigen Anforderungen entsprechen, wodurch für Konstruktion und Entwicklung ein anspruchsvoller Zielkonflikt erwächst. Maßgebliche Problematik ist dabei, eine sich unter Last verformende Geometrie druckdicht zu verschließen. Das Maß und die Art der Bewegung (siehe Abbildung 2.1) machen den Einsatz herkömmlicher Dichtsysteme unrealistisch, weshalb eine speziell angepasste Lösung erforderlich ist [3].

Eine Auswahl nötiger Charakteristiken für etwaige Verschlusskonzepte ist bereits durch Gramüller et al. erarbeitet [3, S. 8 f.]. Diese Überlegungen werden mit den im Folgenden dargestellten Anforderungen aufgegriffen und teilweise erweitert. Die benötigten Eigenschaften lassen sich in primäre und sekundäre Merkmale unterteilen.

Erstere sind durch jede Lösung vollständig und kompromisslos zu erreichen. Strukturmechanisch umfassen sie den Widerspruch, einerseits genügend Steifigkeit zur Aufnahme der auftretenden Drucklast zu bieten und andererseits ausreichend flexibel zu sein, um der Bewegung der Zelle während ihres gesamten Verformungsprozesses zu folgen. Als geometrische Primärforderung ist die vom Zellquerschnitt beschriebene Außenkontur durch den Verschluss zu keinem Zeitpunkt der Deformation zu übertreten. Grund dafür ist der Einsatz mehrerer benachbarter Zellen im Verbund, ähnlich Abbildung 2.2. Da die genannten Anforderungen von allen Konzepten gleichermaßen zu erfüllen sind und keine Toleranz zulassen, dienen sie nicht zum Vergleich der Ansätze untereinander, sondern spiegeln ausschließlich die fundamentalen Ansprüche an ein Bedruckungssystem der Zellen wider.

Die sekundären Forderungen sind durch jede Lösung in höchstmöglichem Maße einzuhalten und erlauben somit eine Bewertung der Konzepte. Als strukturelles Kriterium darf ein Verschluss nur ein Minimum an Widerstand gegen die Zellbewegung entwickeln, um diese möglichst wenig an ihrer Verformung zu hindern. Das Ideal ist eine Lösung, die darüber hinaus in der Lage ist, die Deformation der Zelle sogar zu unterstützen.

Bezüglich einer optimalen Bedruckung muss gewährleistet sein, dass die Drucklast möglichst alle Areale der Zelle gleichmäßig erreicht. Dies trifft besonders auf die Gelenkbereiche zu. Diese dürfen außerdem nicht durch das Einbringen von zusätzlichem Material in ihrer Bewegung gehemmt werden.

Geometrisch ist der Raumbedarf in Zellenlängsrichtung entscheidendes Kriterium, da jede Ausdehnung des Verschlusses in dieser Dimension vom vorhandenen Bauraum abgezogen werden muss und somit die effektive Zelllänge reduziert. Dies bedeutet, dass die endgültige Höhe einer Lösung direkt mit der längenspezifischen Energieausbeute der Zellen verknüpft werden kann.

Weiterhin weisen die Zellen eine Vielzahl von Ausgangsformen auf (siehe dazu Abbildung 2.2). Um diesem Umstand zu begegnen, muss ein erfolgreiches Lösungskonzept leicht auf weitere Geometrien übertragbar sein.

Zusätzliche bewertungsrelevante Merkmale sind ökonomischer Natur. Sie umfassen ein Minimum von Einzelteilen, einfache Montage und Austauschbarkeit von Komponenten. In Tabelle 3.1 sind die genannten Anforderungen noch einmal in komprimierter Form aufgelistet.

Tabelle 3.1: Anforderungen an potenzielles Verschlusskonzept

	Primär	Sekundär
Strukturmechanik	- Flexibilität - Festigkeit	- Minimaler Widerstand gegen Verformung durch Zelle
Bedruckung	- Bedruckung bis 1 MPa	- gleichmäßige Druckverteilung; auch in den Gelenkbereichen
Geometrie	- Bauraum (Außenkontur)	- Bauraum (Längsrichtung) - Übertragbarkeit auf weitere Zellformen
Ökonomie		- Austauschbarkeit - nötige Bauteile und Materialien

3.2 Konzeptentwicklung

Für die Entwicklung eines Zellverschlusses sind besonders die primären strukturellen Forderungen und der daraus entstehende Widerspruch zwischen Flexibilität in Zellenquerschnittsebene und Festigkeit in Zellenlängsrichtung problematisch. Ein erfolgreiches Konzept muss dafür innerhalb dieser beiden Dimensionen vollkommen unterschiedliche Steifigkeiten bieten.

Zwei Konzepte stehen sich dazu gegenüber. Zum einen ist eine Minimierung der belasteten Oberfläche möglich, wobei Kraftaufnahme und Dichtung getrennt realisiert werden, um den Zielkonflikt zu entschärfen. Dies erfordert mehrere Bauteile, erlaubt aber eine größere Auswahl an zu verwendenden Materialien und die optimale Nutzung deren Eigenschaften. Dem gegenüber steht der vollständige Verschluss der Querschnittsfläche durch ein einzelnes Bauteil, welches tragend und dichtend zugleich sein muss. Der Zielkonflikt bleibt hierbei in voller Intensität erhalten und zieht entsprechend höhere Anforderungen an die Struktur nach sich.

Aus den genannten Konzepten lassen sich Lösungsansätze in Form von Schlauch-, Kappen- und Vergussvarianten ableiten. Das bereits durch Boblenz realisierte Bedruckungssystem fällt dabei unter erstere und bedient das Konzept einer Minimierung der belasteten Oberfläche. Weil ein Großteil des Zellquerschnittes von der Flankenbewegung vollkommen unbeeinflusst bleibt, ist es möglich, weite Bereiche starr zu verschließen und nur jene für die Deformation tatsächlich erforderlichen Areale flexibel zu gestalten. Auf diese Weise ist ein Versuchsträger entstanden, bei dem ein flexibler und dichtender Schlauch durch starre Endkappen zur Lastaufnahme unterstützt wird. Die für eine Zellbewegung nötigen Aussparungen lassen sich unterschiedlich gestalten und sind in Abbildung 3.1 beispielhaft dargestellt. Weil die tragenden Elemente einer derartigen Schlauchlösung keine Dehnungen in Zellenquerschnittsebene erfahren, wird die Zellverformung nur durch die Festigkeit des vergleichsweise flexiblen Schlauchmaterials behindert. Die Reststeifigkeit des Schlauches führt allerdings zu nicht ausreichender Bedruckung der Gelenkbereiche, wie bereits in Abschnitt 2 erwähnt. Zur Vermeidung dieses negativen Effektes sind auch reine Endkappen nach gleichem Prinzip möglich. In Kombination mit lokalen Membranelementen zum Verschluss der Aussparungen erlauben sie vollständig freie Zellinnenflächen und eine verbesserte Bedruckung.



Abbildung 3.1: Kappengeometrien mit Aussparungen, welche durch Membran oder Schlauch gedichtet werden können (rot)

Ebenfalls als Kappenlösung ist ein Materialverbund denkbar, bei dem tragende Strukturen (im Bild schwarz dargestellt) direkt in eine flexible Matrix (im Bild rot dargestellt) gebettet werden. Erstere nehmen die in Zellenlängsrichtung wirkenden Lasten auf und verhindern eine zu starke Deformation des vergleichsweise weichen Matrixmaterials, welches wiederum die nötige Verformung der Flanken erlaubt. Ein schematisches Beispiel ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

Als besonders interessanter Ansatz wird innerhalb der vorliegenden Arbeit eine Kappenlösung untersucht, die in Anlehnung an die Wirkungsweise der Zellen deren Bewegung unterstützt. Dies ist möglich, wenn die Kappe unter Druck in einen für sie energetisch günstigeren Zustand strebt, welcher der Konvergenzform der Zelle gleicht. Ein derartiges Verhalten ist nur durch Vorgabe einer geeigneten Geometrie im unbelasteten Zustand möglich. Zum einen kann dies in Analogie zur Zelle durch starre Flächenelemente in Verbindung mit Gelenken erreicht werden, wobei die Art der Ausgangskonfiguration entscheidend für die Bestrebung ist, unter Druck eine Bewegung auszuführen. Zum anderen lässt sich das Prinzip durch das Einbringen von Falten in die Oberfläche im unbelasteten Zustand realisieren. Diese werden bei Bedruckung geglättet und ermöglichen eine gezielte Deformation zur Unterstützung der Kappe. Ein solcher Ansatz ist bereits durch Gramüller als verformungsunterstützende Endkappe oder DSEC (deformation supportive end cap) etabliert worden. [3]

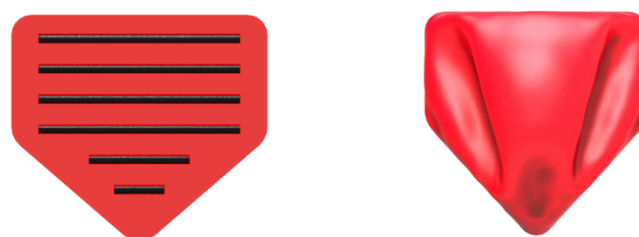


Abbildung 3.2: mögliche Geometrien für Materialverbund- (links) und DSEC-Kappe (rechts)

Da die spätere Einbauhöhe des Zellverschlusses entscheidendes Kriterium ist, soll an dieser Stelle auch die Möglichkeit erwähnt sein, die Zellöffnung durch einen ebenen Verguss zu verschließen. Eine derartige Lösung stellt das Ideal bezüglich des Bauraumkriteriums dar.

Abbildung 3.3 führt beide Konzepte und die daraus hervorgehenden Ansätze noch einmal als Übersicht auf.

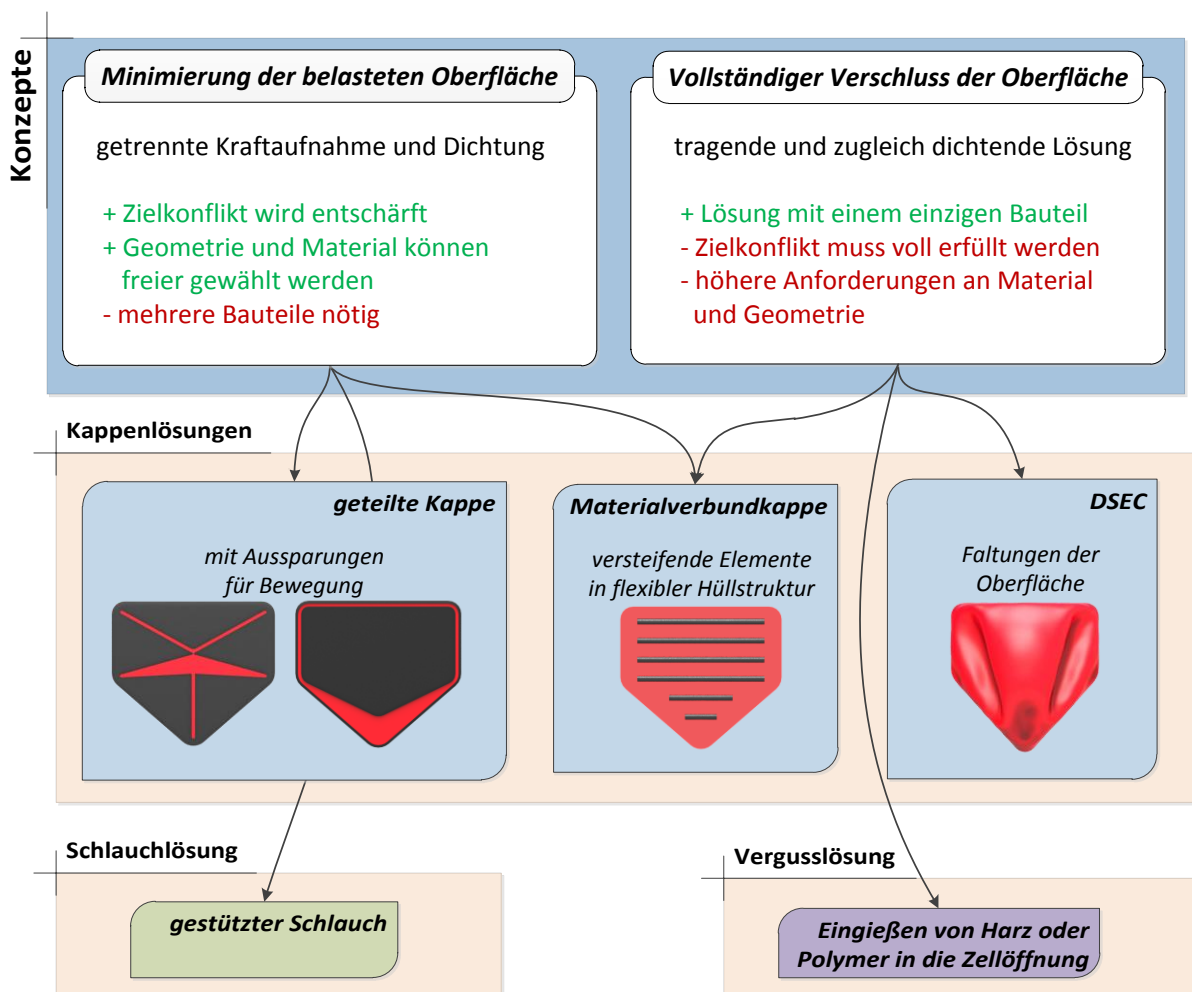


Abbildung 3.3: Übersicht der Konzepte und Lösungsansätze

3.3 Bewertung

Um einen der genannten Ansätze für weitere Untersuchungen auszuwählen, werden diese, basierend auf den in Abschnitt 3.1 erläuterten Sekundäranforderungen, bewertet. Besonders die Kernforderung, eine Zellbewegung möglichst nicht zu hemmen und die erreichbare Verformung sowie ertragbare Last zu maximieren, ist entscheidend. Der Verschluss sollte deshalb nur ein Minimum an zusätzlicher Steifigkeit in Zellenquerschnittsebene einbringen. Der folgende Abschnitt betrachtet Alleinstellungsmerkmale einzelner Ansätze und die daraus entstehenden Vorbeziehungsweise Nachteile.

Die bereits realisierte Schlauchlösung besticht besonders durch die einfache Austauschbarkeit, da Kappen und Elastomerschlauch über eine tragende Gewindestange verbunden sind und als eine Baugruppe (Kartusche) ausgewechselt werden können. Auch in Bezug auf Einbauhöhe und Übertragbarkeit auf neue Zellformen ist dieser Ansatz aufgrund der flachen und vergleichsweise simplen Endkappen eine akzeptable Wahl. Allerdings werden mehrere Einzelteile benötigt und das Zuführen des Arbeitsgases ist nur über die Endkappen und nicht direkt durch die Zellwände möglich. Wichtigster Kritikpunkt bleibt außerdem die unzureichende Bedruckung der Gelenkbereiche. [3, S. 9]

Dieser Nachteil kann mit Kappen- oder Vergusslösungen verhindert werden, da die Zelle, abgesehen von der Einbauhöhe der Kappe, über ihre gesamte Länge unberührt bleibt. Weil Kappen für jede Geometrie passend ausgelegt werden müssen, sind sie bezüglich ihrer Übertragbarkeit und Austauschbarkeit wiederum eingeschränkt.

Ein Verguss bietet das Minimum an nötiger Einbauhöhe und ist leicht auf neue Zellgeometrien zu übertragen. Die Fertigung ist durch Tauchen der gesamten Struktur in ein Kunststoffbad realisierbar und äußerst simpel. Weil die ebene Struktur zur Aufnahme der Drucklast hohe Steifigkeit benötigt und diese dann in Zellquerschnittsebene bei Stauchung und Dehnung große bewegungshemmende Kräfte nach sich zieht, ist die für eine Verformung nötige Energie allerdings enorm.

Allein der DSEC-Ansatz bietet das Potenzial, die Deformation der Zelle durch das eigene Streben in eine ähnliche Form zu unterstützen. Die bei Verformung des

Verschlusses auftretenden Kräfte sind zugunsten der Zellbewegung orientiert, weil sie direkt aus der Bedruckung resultieren. Die Minimierung des Energiebedarfs stellt das wichtigste Kriterium für den Verschluss der formvariablen Strukturen dar, weshalb eine Untersuchung der DSEC als ambitionierte aber vielversprechende Lösung favorisiert wird und im Fokus der vorliegenden Arbeit steht. Tabelle 3.2 stellt diese Überlegungen noch einmal kompakt dar. Dabei handelt es sich um eine Bewertung der verschiedenen Ansätze nach Rängen innerhalb der einzelnen Kriterien. Werden Lösungen als ebenbürtig angesehen, werden sie ebenso bewertet.

Tabelle 3.2: Bewertungsmatrix der verschiedenen Lösungsansätze

Anforderung	Widerstand gegen Verformung	Bedruckung der Gelenkbereiche	voraussichtliche Einbauhöhe	Übertragbarkeit	Austauschbarkeit	nötige Bauteile und Materialien	Summe
Wichtungsfaktor	3.0	2.0	1.5	1.5	1.0	1.0	10.0
Schlauch	3	2	2	2	1	4	24
Kappe mit Aussparungen	2	1	2	3	2	2	20
Materialverbundkappe	4	1	2	3	2	3	27
DSEC	1	1	3	4	2	1	19
Verguss	5	1	1	1	3	1	24

3.4 Umsetzung

Das Prinzip der DSEC erfordert, dass die Kappe unter Druck entlang ihrer Kontaktanten selbstständig aufgrund ihrer geometrischen Beschaffenheit zur Konvergenzstellung der Zelle strebt. Demzufolge bewirkt die Bedruckung einen Wechsel der Kappe aus einer Konfiguration in eine andere. Um dies zu gewährleisten, muss die Form der Kappe für die Belastungssituation optimal und energetisch günstiger als ihre Fertigungsgeometrie sein. Da letztere noch vollständig unbekannt ist, beginnt die vorliegende Analyse mit der Suche nach der für die Lastsituation idealen Kappenform. Sie soll danach in den unbelasteten Zustand überführt werden, um Erkenntnisse über die tatsächlich erforderliche Einbau-geometrie zu erlangen. Der Auslegungsprozess bewegt sich damit vom Betriebs- zum Fertigungszustand und entgegen der tatsächlichen Verformung unter Last. Abbildung 3.4 verdeutlicht diesen Ablauf mit den entsprechenden Konfigurationen von Kappe und Zelle.

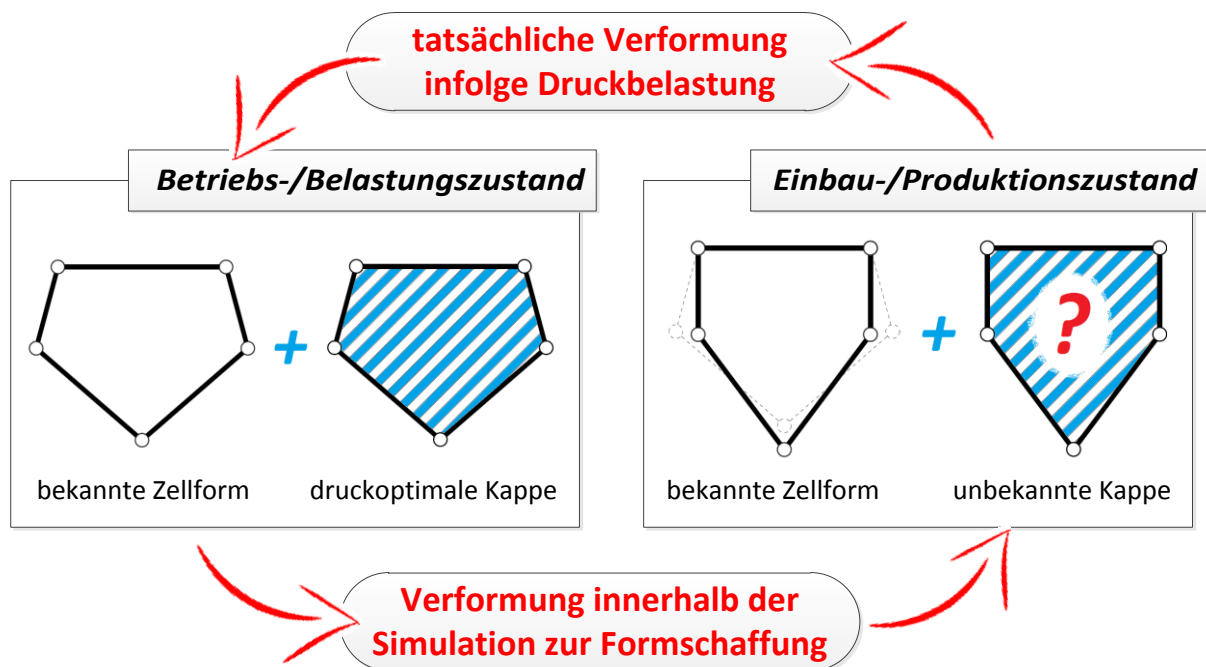


Abbildung 3.4: Konzept zur Entwicklung der unbekannten Einbauform der Kappe

Ausgangspunkt dieser Vorgehensweise ist die Kenntnis der Zellgeometrien, sowohl im bedruckten, als auch unbelasteten Zustand. Beide sind bereits zusammen mit den zugehörigen Bewegungsabläufen durch Gramüller und Boblenz ausführlich untersucht und dokumentiert [3; 4]. Die gewonnenen Erkenntnisse können entsprechend weiterverwendet werden. In die bekannte Belastungsform der Zelle hinein wird eine

idealisierte Kappenform erarbeitet, die die im Betriebszustand vorherrschenden Drucklasten optimal und unter bestmöglicher Nutzung des Materials aufnimmt. Im eigentlichen Schritt der Geometrie-schaffung werden die Flanken der Zelle in den Fertigungszustand verdreht. Die dadurch eingebrachten Deformationen werden infolge der in Abschnitt 2 erwähnten Bauraumbeschränkungen auf die Kappe übertragen. Durch den für diese Bewegung nötigen Materialtransport entsteht aus der optimalen Belastungsgeometrie die gesuchte Einbauform. Unter erneuter Bedruckung strebt sie in den zuvor erarbeiteten Idealzustand und unterstützt somit die Bewegung der Zelle. Da die beschriebene Formfindung entgegen dem Realverhalten unter Last stattfindet und in dieser Form nicht experimentell zu realisieren ist, wird auf numerische Simulationen zurückgegriffen. Ein Überblick zu diesem Vorgehen findet sich in Abschnitt 3.4.2.

3.4.1 Theoretischer Hintergrund

Die erste Teillösung des beschriebenen Konzeptes ist die Generierung einer auf den Betriebszustand optimierten Kappe innerhalb der bekannten Zellform. In Kombination mit der Zelle ist die Endkappe als Druckbehälter zu verstehen, weshalb für die Auslegung und Gestaltung einer Idealform in Näherung auf die als Kesselformel bekannte Beziehung zurückgegriffen werden kann. Demnach ergeben sich axiale und tangential Spannung σ_a , σ_t innerhalb zylindrischer Druckkörper in Abhängigkeit von Innendurchmesser d , Innendruck p und Wandstärke s wie folgt:

$$\sigma_a = \frac{p \cdot d}{4 \cdot t} \qquad \sigma_t = \frac{p \cdot d}{2 \cdot t} \qquad (3.1)$$

Da gemäß dieser Formulierung die Axialspannung immer der Hälfte der tangentialen Spannung entspricht, streben flexible Materialien unter Druck einer Geometrie entgegen, die Erstere begünstigt. Grenzfall ist eine sphärische Oberfläche, bei welcher die Tangentialspannung verschwindet und nur noch konstante, axiale Kräfte einen Isotensoid formen. Dieser Zusammenhang bewirkt die kugelförmige Ausbildung eines durch Druck belasteten Fluidfilms, beispielsweise einer Seifenblase, unabhängig vom ebenen Ausgangsquerschnitt. Durch das ungehinderte Fließen des Materials wird eine optimale Ausnutzung des Werkstoffes und daraus resultierend ein homogener Spannungsverlauf ermöglicht.

Übertragen auf die Problematik der Kappen muss deshalb innerhalb der Simulation eine Konfiguration, möglichst nah am isotensoiden Zustand geschaffen werden, um eine für Druckbelastung optimale Geometrie zu gewährleisten. Diese ist außerdem tangentialstetig, weil Unebenheiten der Oberfläche eine Spannungsinhomogenität zur Folge haben. Für die Findung einer derartigen Form wird versucht, die Mechanik eines bedruckten Fluidfilms realitätsnah nachzubilden und die Geometrie direkt aus Belastung sowie resultierendem Spannungsverlauf zu erarbeiten. Dies geschieht in Analogie zur Bildung von Seifenblasen durch das iterative Bedrucken einer ebenen, dünnwandigen Membran aus dem Zellquerschnitt heraus. Eine Darstellung dieser Vorgehensweise findet sich in Abbildung 3.5.

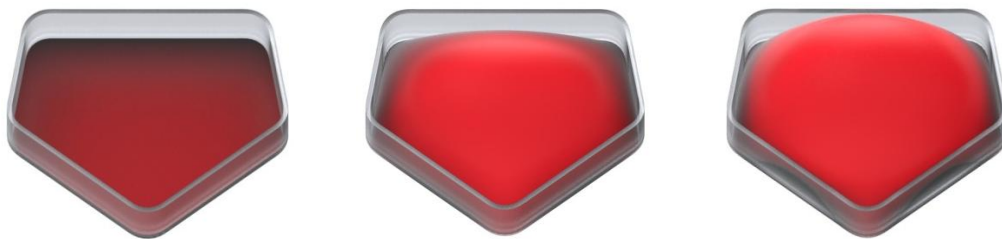


Abbildung 3.5: Unterschiedliche Zustände einer zuvor ebenen Membran bei Bedruckung

Aufgrund der Abweichung des Zellquerschnittes von einer Kreisform, wird die ausgewölbte Kappe kontaktierende Bereiche mit den Zellflanken bilden, um weitgehend kugelförmig und auch nahe den Gelenkbereichen tangentialstetig zu bleiben. Ein entscheidender Faktor dafür ist die endgültige Kappenhöhe, weshalb es gilt, sie vor Beginn der Simulation abzuschätzen.

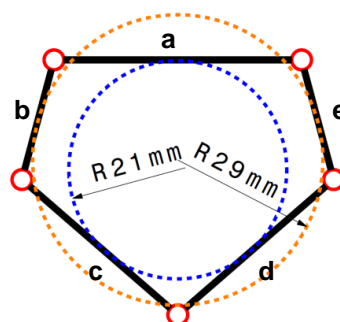


Abbildung 3.6: Zelle in Konvergenz mit Innenkreisen

Ausgehend von den Zellabmessungen entsprechend Abbildung 2.3 ergibt sich im Konvergenzzustand eine Geometrie gemäß Abbildung 3.6. Dargestellt sind die zwei möglichen Innenkreise tangential zu den Zellflanken. Eine nahezu sphärische Idealform ist zwischen diesen beiden Limitationen zu erwarten, weshalb der Mittel-

wert beider Radien mit 25 mm als optimale Kappenhöhe prognostiziert wird. Eine niedrigere Kappe weicht nahe den Flanken b und e sowie allen Gelenkbereichen stark von der Kugelform ab, um den Zellquerschnitt zu verschließen (siehe blauer Kreis in Abbildung 3.6). Ein größerer Kappenradius führt zu übermäßigem Kontakt entlang der Flanken a, c sowie d , wodurch ein Optimum ebenfalls verhindert wird (siehe orangener Kreis in Abbildung 3.6). Zur Validation dieser Annahme werden Kappen mit einer Höhe von 20 mm , 25 mm und 30 mm generiert und verglichen. Außerdem ist die Kappenhöhe ein entscheidendes Kriterium für den Vergleich mit anderen in Kapitel 3.2 dargestellten Ansätzen in Bezug auf das Energiepotenzial der jeweiligen Lösung. Sie wird deshalb im weiteren Verlauf der Untersuchung als Variable behandelt.

Auf die Schaffung der druckoptimalen Kappe im Belastungszustand folgt die Verformung des Systems in die Einbaukonfiguration, um die Fertigungsform der Kappe zu erstellen (siehe Abbildung 3.4). Durch Verdrehung der Flanken wird die Zelle in den unbelasteten Zustand transformiert und zwingt aufgrund des Kontaktes mit der Kappe diese ebenfalls in die gleiche Form. Infolge der Bauraumbeschränkung kann die Kappe die Zellabmessungen nicht überschreiten und muss die eingebrachten Deformationen innerhalb des Einbauquerschnittes realisieren. Dabei gilt es, Dehnung, Stauchung und Scherung des Materials gering zu halten und die Verformungsenergie stattdessen mittels Biegung in Form von Auffaltungen und Ausbeulungen der Oberfläche zu kompensieren. Auf diese Weise soll erreicht werden, dass die Kappe unter Druck möglichst spannungsarm und mit einem Minimum an Energieverlust zurück in den nahezu isotenoiden Zustand strebt und für diesen Prozess auch ausreichend Material zur Verfügung steht. Die Generierung von möglichst vielen Faltungen der Oberfläche ist wünschenswert, um bei späterer Belastung erneut eine Verformung durch energiearmes Biegen zu begünstigen. (siehe Abschnitt 4.2.3).

Mit diesem Schritt ist die Formfindung abgeschlossen und resultiert idealerweise in einer Kappe noch unbekannter Geometrie, die unter Drucklast bestrebt ist, die eingebrachten Falten aus der Oberfläche zu glätten und dadurch die Deformation der Zelle unterstützt. Der folgende Abschnitt enthält einen kurzen Überblick der dazu erforderlichen Einzelschritte innerhalb der FE-Simulation.

3.4.2 Numerisches Vorgehen

Für die nötigen Simulationen wird in der vorliegenden Arbeit das FE-System ANSYS Mechanical mit der zugehörigen Programmiersprache „ANSYS Parametric Design Language“ (APDL) verwendet. Ziel ist die Entwicklung eines Makro-Programms, welches mittels Schleifen und Abfragen selbstständig auf vorhergesehene Zustände reagiert und größtmöglich automatisiert zu der übergebenen Zellform eine Ideal-kappe generiert. Dabei muss ein hoher Grad an Flexibilität gewährleistet werden, um problemlos Lösungen für verschiedene Basiszellen zu erstellen. Die folgenden Kapitel gehen detailliert auf die Vorgehensweise und Systematik dieser Simulationen ein. Der übergreifende Ablauf stellt sich gemäß Abbildung 3.7 dar, wobei die einzelnen Zwischenschritte aus weiteren Teilschritten bestehen.

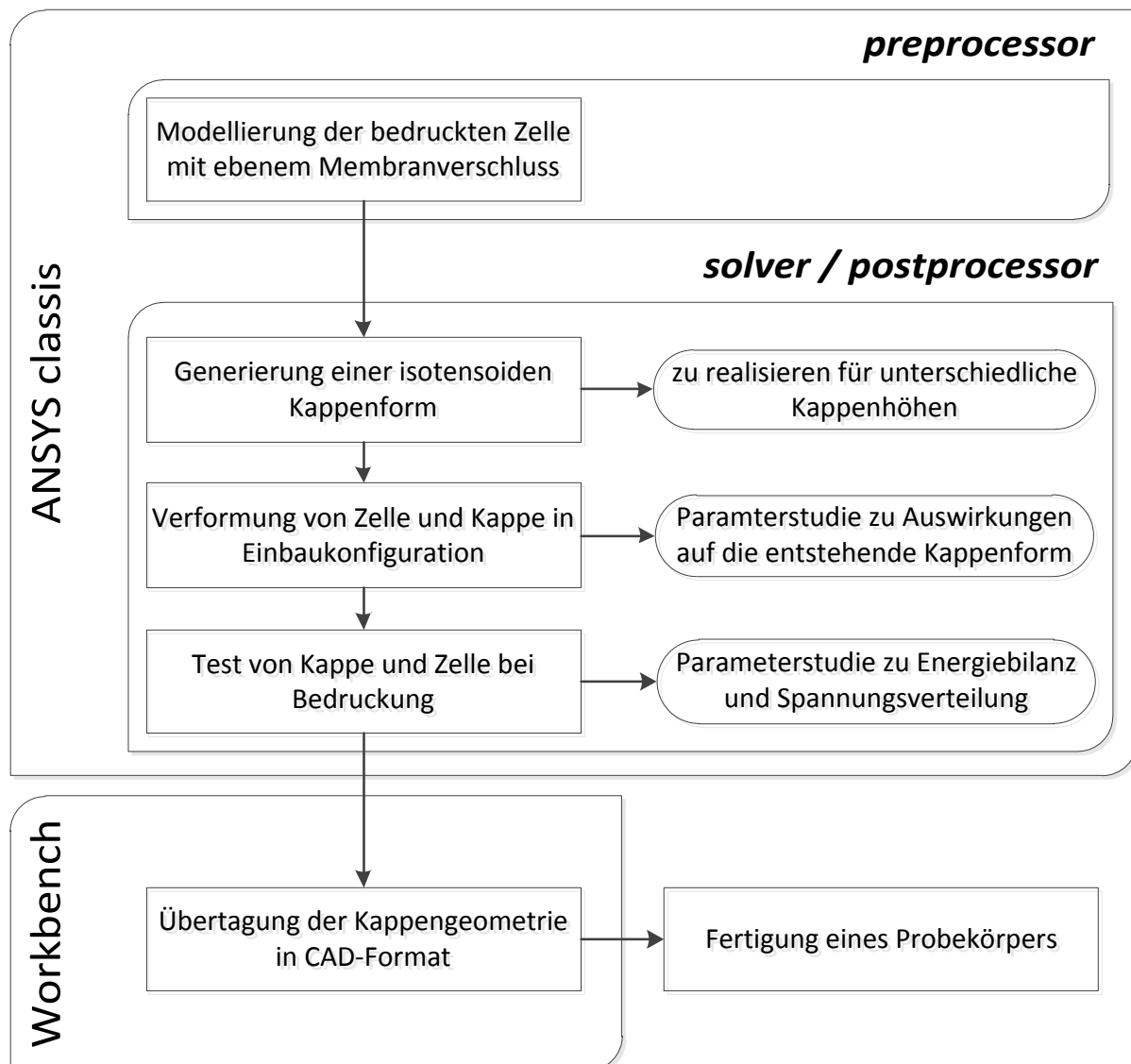


Abbildung 3.7: Ablauf der Simulation

Die Modellierung der bedruckten Zelle findet basierend auf den in Abbildung 2.3 dargestellten Maßen statt. Es folgt die Generierung der isotensoiden Form für alle drei in Abschnitt 3.4.1 definierten Sollhöhen sowie die Verformung von Zelle und Kappe in die Einbaukonfiguration. Beide Prozesse gehören zur Formfindung und dienen jeweils der reinen Schaffung eines geometrischen Optimums. Dies erlaubt die Vorgabe von fiktiven Materialkennwerten ohne reales Pendant, um das Verhalten der Struktur den Erfordernissen anzupassen. Für die Entwicklung des Isotensoids bedeutet dies konkret ein membranartiges Verhalten, um der Analogie zum Fluidfilm gerecht zu werden. Bei der anschließenden Zellverformung soll dagegen ein Faltenwurf der Oberfläche begünstigt werden. Eine Parameterstudie untersucht den Einfluss von vorgegebener Wandstärke und Elastizitätsmodul auf dieses Verhalten.

Nach der Schaffung verschiedener Kappengeometrien im Fertigungszustand ist es erforderlich, diese in einem möglichst realitätsnahen Bedruckungsprozess zu simulieren, um die Wirksamkeit aller gemachten Annahmen zu validieren. Innerhalb dieses finalen Teilschrittes ist der Einsatz tatsächlich verwendbarer Werkstoffkennwerte erforderlich, um Aussagen zur endgültigen Belastungsgeometrie der fertigen Kappe zuzulassen. In einer Studie werden verschiedene Kombinationen von Material und Wandstärke verglichen, um ein Optimum zu erarbeiten. Ausschlaggebend für das Auffinden der Ideallösung ist das Vermögen der Kappe, Bewegungsenergie an die Zelle abzugeben. Auch unter diesem Gesichtspunkt findet eine Evaluation der entstandenen Kappenformen statt.

Da während der gesamten Simulation alle Geometrien nur als deformiertes Netz innerhalb von ANSYS Mechanical vorliegen, ist abschließend die Übertragung der energetisch besten Kappe im Einbauzustand in ein CAD-Format zu realisieren, um die Fertigung von Prototypen zu ermöglichen.

4 DSEC-Strategie

Entgegen der typischen Vorgehensweise im Bereich der FE-Analyse, welche als Modellschaffung die Vorgabe einer Geometrie sowie die Definition der Lastsituation versteht, umfasst die Modellierung in der vorliegenden Arbeit bereits eine Vielzahl von numerischen Lösungen. Aufgrund des in Abschnitt 3.4 erarbeiteten komplexen und abstrakten Konzeptes zur Formfindung einer DSEC-Kappe ist ein Modell nicht allein auf Basis einer Ausgangsgeometrie realisierbar. Die tatsächlich zu untersuchende Kappenform ist vollständig unbekannt und kann nur lastbedingt entwickelt werden. Das vorliegende Kapitel widmet sich den nötigen Einzelschritten bis zur Entstehung einer die Deformation unterstützenden Kappe und wird daher als Modellierung betrachtet. Die Simulation der erarbeiteten Struktur erfolgt anschließend und wird mit den endgültigen Ergebnissen gesondert in Abschnitt 5 betrachtet. Die folgenden Kapitel gliedern sich gemäß der in Abbildung 4.1 gezeigten Unterteilung und den darin enthaltenen Zwischenständen. Der detaillierte Ablauf der Simulation kann im Anhang A1 (Seite VI) nachvollzogen werden. Die verwendeten Makro-Dateien können im Anhang C (ab Seite XII) eingesehen werden.

Die zu realisierende Simulation erfordert aufgrund der zu erwartenden Kontakt-situation sowie großer Verformung und Dehnung grundsätzlich eine nichtlineare Berechnung. Dies wirkt sich auf die Wahl von Elementtypen und –formen aus. [5]

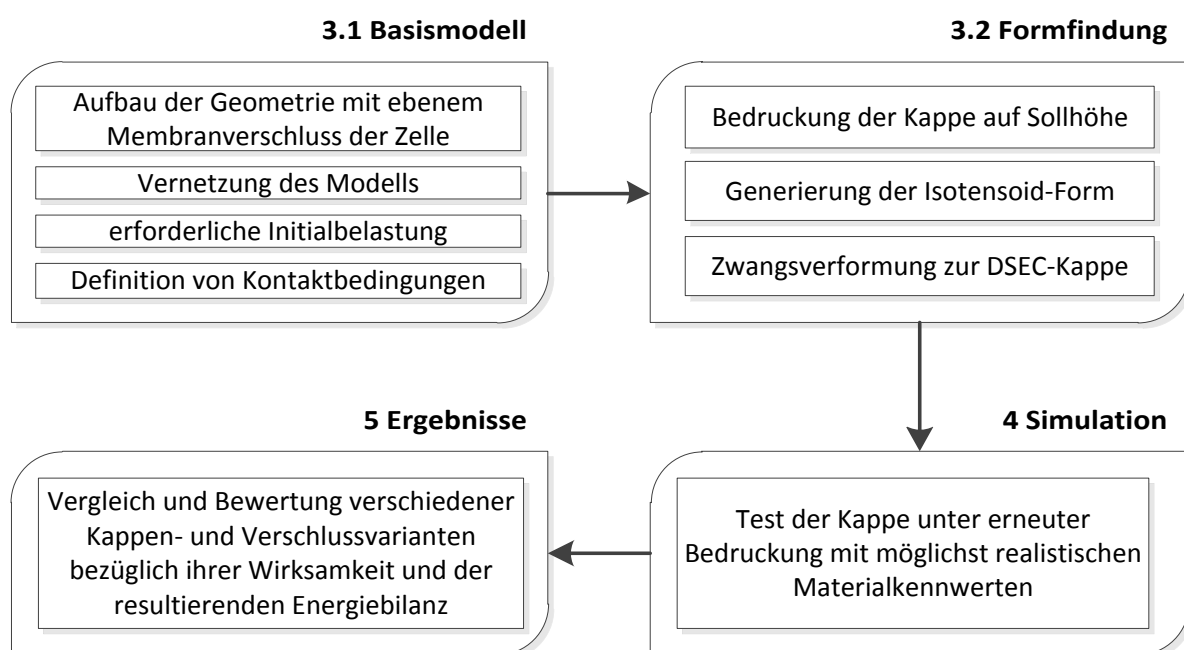


Abbildung 4.1: Unterteilung und Einzelschritte der Simulation

4.1 Basismodell

Die Schaffung eines Modells ist in ANSYS Mechanical grundsätzlich durch zwei verschiedene Vorgehensweisen realisierbar. Zum einen ist der Import externer Geometriedaten aus gängigen CAD-Formaten mit anschließender Vernetzung und Definition von Lagerung sowie Belastung möglich. Und zum anderen unterstützt die Software den Aufbau einer Geometrie mittels der Definition von Koordinatenpunkten, welche als Begrenzung von Linien-, Flächen- und Volumenelementen zu komplexen Strukturen kombiniert werden können. [6, S. 13 ff.]

Im vorliegenden Fall sind die nötigen CAD-Daten verschiedener Zellvarianten bereits in geeigneter Form vorhanden und ein komfortables Importieren bietet die originalgetreue und detailgenaue Übertragung der Geometrie in ein Volumenmodell. Aufgrund der hohen Anforderungen an Parametrisierung und Netzkontrolle sowie der Übertragbarkeit des Modells auf weitere Zellversionen als Hauptforderungen der Aufgabenstellung wird dieses Verfahren innerhalb der vorliegenden Arbeit nicht angewandt. Des Weiteren ist die Verwendung von einfachen zweidimensionalen Elementtypen gegenüber Volumenelementen allein aufgrund der deutlich geringeren Berechnungszeit zu bevorzugen [6, S. 17]. Vor diesem Hintergrund ist ein Aufbau des gesamten Modells durch manuelle Eingabe von Koordinatenpunkten in Verbindung mit der Verwendung von Balken- und Schalenelementen sinnvoll.

4.1.1 Geometrie

Eine Übertragung der Realgeometrie der Polyamidzellen, wie in Abbildung 2.4 dargestellt, ist aufgrund ihrer tangentialstetigen Auslegung vergleichsweise komplex für eine parametrische Modellierung innerhalb von ANSYS Mechanical. Deshalb werden die gewölbten Zellflanken als geradlinige Verbindungen zwischen den Gelenken approximiert. Um eine Übertragbarkeit auf beliebige Zellformen zu gewährleisten, basiert die Geometrieschaffung ausschließlich auf der Übergabe von Koordinaten der Gelenkpunkte sowie einer Angabe der Gelenkanzahl. Letztere ist nötig, damit im weiteren Aufbau des Modells Linien- und Flächensegmente anhand ihrer geometrischen Lage in Abhängigkeit von der Basiszelle identifizieren werden können.

Im vorliegenden Modell wird der Querschnitt der Zelle durch Verbindung der fünf Eckpunkte des konvergierten Belastungszustandes gebildet. Die entstehenden Schnittpunkte werden verrundet, um die tatsächliche Zellform möglichst exakt darzustellen (siehe Abbildung 4.2).

Zur Imitation der strukturmechanischen Charakteristik werden dreidimensionale Linien-Balkenelemente verwendet, welche sich passend zum realen Verhalten der Zelle manipulieren lassen. Basierend auf der Balkentheorie sind diese dazu in der Lage, Deformationen mit einem Minimum an Rechenzeit und geometrischen Kennwerten korrekt abzubilden. Zum Einsatz kommen Elemente vom Typ BEAM188. Diese werden für die ressourcenschonende Simulation der im vorliegenden Fall auftretenden nichtlinearen Verformungen empfohlen [7, S. 1055]. Die aufwendige Modellierung von Volumenkörpern entfällt. Für die Realisierung der Festkörpergelenke wird in Analogie zur tatsächlichen Zelle ebenfalls eine Querschnittsänderung angewandt, aus welcher die nötige Steifigkeitsminderung resultiert. Diese ebene Skelettkonstruktion dient als tragendes Grundgerüst und gewährleistet bei späterer Belastung ein physikalisch korrektes Reagieren des Modellquerschnittes, welcher sich außerdem aufgrund der simplen Struktur leicht variieren lässt. Dies gilt sowohl für die Geometrie, als auch für die Mechanik der Zelle.

Für die Definition der räumlichen Ausdehnung des Modells kommen Schalenelemente des Typs SHELL181 zur Anwendung, welche durch geringe Wandstärke sowie Elastizitätsmodul in ihrer Auswirkung auf die Steifigkeit des Gesamtsystems vernachlässigt werden können. Bei der Generierung einer quasi-isotensoiden Kappenform und anschließenden Deformationen fungieren sie in Kombination mit entsprechenden Kontakt- und Lagerbedingungen allerdings als Bauraumbegrenzung.



**Abbildung 4.2: schematische Darstellung der unterlegten Balkenkonstruktion (links),
umgebenden Schalenstruktur (Mitte) und ebenen Verschlussmembran (rechts)**

Um die eigentliche Kappe durch ausreichende Bedruckung aus einer ebenen Struktur zu generieren, wird der noch offene, durch die Balkenkonstruktion beschriebene, Zellquerschnitt ebenfalls durch flächige Schalenelemente verschlossen (siehe Abbildung 4.2). Um das erwünschte Verhalten analog einer Seifenblase zu erzielen, werden die verwendeten SHELL181-Elemente mit der sogenannten Membran-Option modelliert. Dadurch können sich die Elemente nur innerhalb der Ebene ihrer Oberfläche deformieren und sind nicht in der Lage, Biegemomente aufzunehmen [7, S. 110]. Im Schnitt betrachtet verhält sich die Kappe somit ähnlich einem Seil ideal biegeweich. Die Geometrie der verschiedenen, zuvor beschriebenen Einzelteile des Modells sind in Abbildung 4.2 vereinfacht dargestellt.

4.1.2 Vernetzung

Ein entscheidendes Kriterium für die Qualität der Simulationsergebnisse ist die Art der Vernetzung innerhalb des Modells. Die verwendeten Schalenelemente können sowohl in viereckiger, als auch dreieckiger Form vernetzt werden, wobei letztere sich als Degeneration der ersteren darstellt. Es werden dazu zwei der Eckpunkte aufeinander gelegt (siehe Abbildung 4.3).

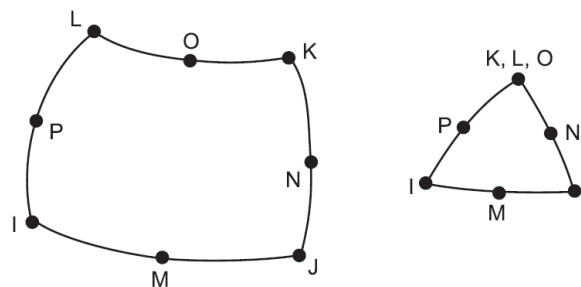


Abbildung 4.3: Beispiel zur Degeneration der Elementform [6, S. 120]

Grundsätzlich wird der Einsatz von viereckigen Elementen mit Verweis auf die höhere Genauigkeit der zu erreichenden Ergebniswerte empfohlen. Auch in Bezug auf Netzkontrolle und symmetrische Vernetzung sind diese den degenerierten Elementformen überlegen. Demgegenüber sind dreieckige Elemente besser geeignet, Verrundungen, wie sie entlang der Membran auftreten, abzubilden. [7]

Weiterhin sind viereckige Elemente nicht zu gleichermaßen großen Verzerrungen in der Lage. Für die verwendeten SHELL181-Elemente beträgt der maximal darstellbare Winkel zweier Kanten zueinander $90^\circ \pm 45^\circ$ [7, S. 62]. Dabei ist unerheblich, ob

dieser Wert bereits beim Vernetzen der Geometrie oder erst durch Belastung erreicht wird. Im vorliegenden Fall resultieren die Bedruckung der Verschlussmembran und das anschließende Aufwölben der Kappe in Elementverzerrungen oberhalb des Grenzwertes und machen den Einsatz degenerierter Dreieckselemente für das Areal der Membran erforderlich.

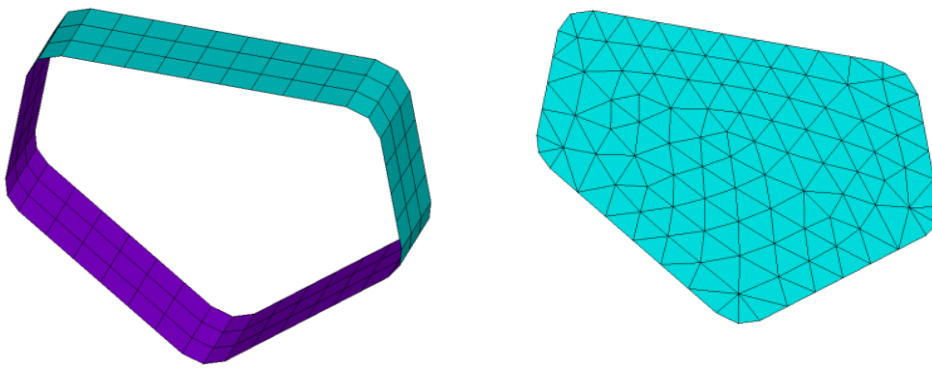


Abbildung 4.4: Vernetzung von Zelle (links) und Membran (rechts)

Für die Zellbereiche des Modells ist die gezielte Kontrolle der Knotenpunktkoordinaten essentiell, um die spätere Verdrehung der Flanken zu ermöglichen (Details finden sich in Abschnitt 4.2.3). Konkret muss gewährleistet sein, dass sich in Zellenlängsachse durch alle Zellelemente derselbe Querschnitt darstellt. Knotenpunkte müssen dazu exakt übereinander orientiert werden, da sie nur auf diese Weise über ihre Position für die beschriebene Rotation selektiert werden können. Daraus resultiert eine Rechteckform der Elemente, deren Größe durch die gezielte Unterteilung der, die beteiligten Areale begrenzenden, Liniensegmente garantiert wird. Abbildung 4.4 zeigt die unterschiedlichen Elementformen innerhalb des Modells. Die dargestellten Elementgrößen dienen lediglich der Veranschaulichung. Einzelheiten zu tatsächlich gewählter Elementgröße sind sich in Abschnitt 5.1 erläutert.

4.1.3 Initialbelastung

Die im letzten Abschnitt vernetzte, noch ebene Kappenstruktur soll im Folgenden durch Bedruckung erst bis auf eine Sollhöhe gewölbt und anschließend in den quasi-isotensoiden Zustand überführt werden. Allerdings stellt die anfängliche Instabilität der gewählten Membranelemente eine typische Problematik bei der Simulation von Drucklasten dar [8]. Werden die Elemente einer Flächenlast unterzogen, so bieten

sie einzeln betrachtet keinen Widerstand gegen eine translatorische Bewegung in Lastrichtung. Grund hierfür ist die Analogie der Membran zu einem Seil, welche ohne entsprechende Vorspannung die Aufnahme von Querkräften und Biegemomenten ausschließt.

In vergleichbaren Realsituationen entstehen die nötigen Spannungen infolge der Lagerung und Bewegung des Materials, die wiederum zu einer Versteifung der Struktur führen. Diese Zusammenhänge können durch ANSYS allerdings nicht automatisch erkannt werden, wodurch eine Konvergenz der Rechnung verhindert wird. Es kommt zum Versatz der Elemente und als Reaktion darauf zum Abbruch der Simulation aufgrund unzulässig starker Festkörperbewegung.

Zur Lösung dieses Problems ist eine Initialbelastung der Membran nötig, um durch Vorspannung der Elemente eine ausreichende Stabilisierung des Modells für den eigentlichen Lastfall zu realisieren. Eine praktikable Vorgehensweise wird in [8] mit dem Einsatz von thermischer Belastung erläutert. Durch einen der Drucksimulation vorgeschalteten Lösungsschritt wird die Membranstruktur unterkühlt und es kommt zu homogener Wärmespannung. Diese äußert sich entlang der Lagerung in Form von Zugkräften und ermöglicht wiederum die Aufnahme von Querkräften durch die Membranelemente. Das Modell stabilisiert sich, konvergiert und erlaubt die anschließende Beaufschlagung der Elemente durch eine Flächenlast. Entscheidend ist, dass innerhalb der Simulation auf die Berechnung der thermischen Initialbelastung unmittelbar die eigentliche Drucklast folgt [8, S. 3]. Ein Verlassen des Solution-Moduls beendet den erzeugten Lastzustand und macht die nötigen Spannungen zunichte.

4.1.4 Kontaktbedingungen

Bei der Bedruckung einer ebenen Membran innerhalb der Zelle, ähnlich dem Aufblähen einer Seifenblase, muss es zwangsläufig zu kontaktierenden Bereichen zwischen der Kappe und den Zellflanken kommen. Weder die im Modell verwendeten Balken- und Schalenelemente, noch jedwede andere in ANSYS verfügbaren Strukturelemente bieten die Möglichkeit, einen Kontakt mit anderen Elementen zu detektieren. Dies gilt sowohl für das Kontaktieren von Bauteilen im Ausgangszustand, als auch infolge von Krafteinwirkung. Kommt es zu ausreichend

großen Verformungen, bricht die Simulation dennoch nicht ab, sondern die Bauteile durchdringen einander ohne Berücksichtigung einer Steifigkeitsänderung. Sollen Berührungen mechanisch korrekt dargestellt werden, ist die separate Definition sogenannter Kontaktpaare, bestehend aus Ziel- und Kontaktelementen nötig, welche sich ohne strukturelle Eigenschaften als zusätzliche Oberfläche über beliebigen anderen Strukturen generieren lassen.

Hintergrund für diese gesonderte Behandlung ist der enorme Rechenaufwand, den diese Elemente zur Überwachung der Kinematik und die Detektion einer Kontaktsituation in die Simulation einbringen [9, S. 23]. Die Konvention zur Definition von Kontaktpaaren empfiehlt die Modellierung starrer Körper als Zielelemente und passend dazu belastete, sich verformende Bauteile als Kontaktelemente [9, S. 25]. Es ist daher vor der Simulation eine Abschätzung und Identifikation der voraussichtlich kontaktierenden Bauteile und Bereiche nötig. Da alle flächenbehafteten Elemente des Modells vom Typ SHELL181 gewählt sind, kommen auch ausschließlich Kontaktpaare aus diesem Bereich infrage. Konkret bedeutet das im vorliegenden Fall die Verwendung der empfohlenen Typen CONTA173 und TARGE170 [9, S. 23]. Diese überlagern die Schalenkonstruktion, nutzen dieselben Knoten und generieren so auch dieselbe Elementform. Entscheidend für eine Kontaktdetektion ist außerdem die Ausrichtung der jeweiligen Elementnormalen des Kontaktpaares zueinander.

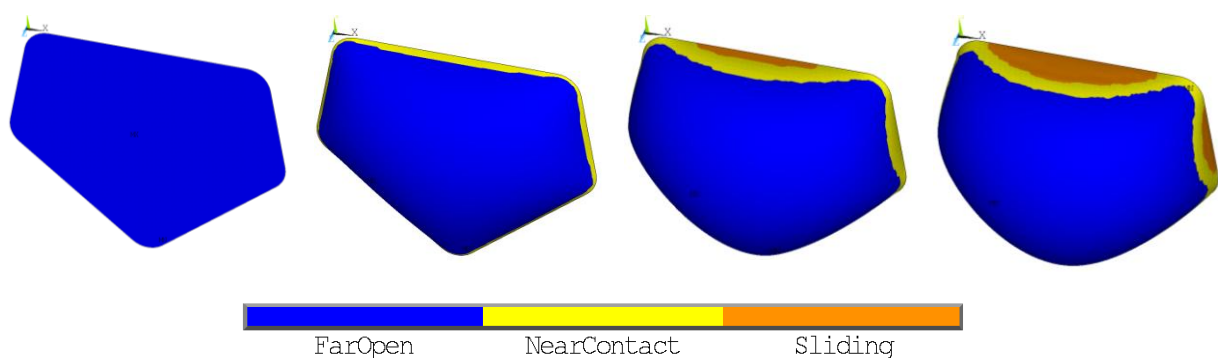


Abbildung 4.5: Kontaktsituation im Laufe der Bedruckung

Entlang dieser Normalen wertet ANSYS Daten bezüglich des Abstands beider Partner aus und unterscheidet zwischen den vier Situationen Fernfeld, Nahfeld, gleitender Kontakt und Haftkontakt. Abbildung 4.5 zeigt die verschiedenen Stadien des Kontaktes bei steigender Auswölbung der Kappe.

4.1.5 Der UPCOORD-Befehl

Analog zu realem Materialverhalten innerhalb des elastischen Bereiches bleiben kraft- und spannungsinduzierte Formänderungen auch in ANSYS nur über die Dauer der Lasteinwirkung bestehen. Wird das Modell in einem darauffolgenden Simulationsschritt entlastet, so strebt auch die Struktur zurück in ihren Ursprungs-zustand. Wird nicht ausdrücklich plastisch gerechnet, so trifft dies auch auf beliebig große Deformationen zu.

Im vorliegenden Fall ist dieses Verhalten allerdings hinderlich, da es innerhalb der Gesamtsimulation gemäß Abbildung 3.7 mehrfach unumgänglich ist, einzelne Verformungszustände und Zwischenergebnisse des Modells als Ausgangspunkt für weitere Schritte heranzuziehen. Dies macht eine Verwendung der deformierten Geometrie als Startkonfiguration bei erneuter Belastung nötig. Die APDL bietet zu diesem Zweck die Möglichkeit, entstandene Formänderungen ohne Berücksichtigung der dazu nötigen Spannungen „einzufrieren“. Der Befehl „upcoord“ addiert den Koordinaten aller Knotenpunkte im unbelasteten Zustand die entsprechenden Verformungsvektoren auf, wobei diese Summation mit einem Multiplikator versehen werden kann. Das innerhalb des Lastschrittes deformierte Netz wird auf diese Weise in eine unbelastete FE-Geometrie konvertiert und kann nachfolgend einer erneuten Simulation unterzogen werden. Bestehende Spannungsverläufe sind zwar noch einsehbar, verlieren aber ihre Wirkung bezüglich einer elastischen Rückverformung in den Ursprungszustand.

Der Befehl ist anzuwenden, wenn Modelle in unterschiedlichen, teils widersprüchlichen Lastfällen separat untersucht werden sollen, ohne dass diese automatisch in Superposition überlagert werden. In der vorliegenden Arbeit ist dies erforderlich, weil die Formfindung, wie in Abbildung 3.7 beschrieben, durch Belastung erfolgt und anschließend weiterführende Simulationen unter veränderter Belastungssituation an der Geometrie durchgeführt werden. Des Weiteren sind für das Aufblähen der Kappenform aus einer ebenen Membran extreme Verformungen nötig, die einzelne Elemente des FE-Modells die ihnen innerhalb der Software hinterlegten Grenzwerte überschreiten lassen. Die Simulation wird in diesem Fall selbstständig durch ANSYS aufgrund zu großer Elementverzerrung als nicht plausibel angehalten. Durch den Einsatz des „upcoord“-Kommandos kann dieses Abbruchkriterium gezielt umgangen

werden. Dabei ist zu beachten, dass der Befehl nur innerhalb des Preprocessors Gültigkeit hat und auf zuvor berechnete Ergebnisse nach Verlassen des Solution-beziehungsweise Postprocessor-Moduls nicht mehr zurückgegriffen werden kann. Zur Bewältigung der in den folgenden Absätzen dargestellten Abläufe ist „upcoord“ in Verbindung mit iterativeren Bedruckungsprozessen dennoch alternativlos, um ausreichend große Deformationen zu realisieren.

4.2 Formfindung

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Erstellung der erforderlichen Basisgeometrie und Kontaktbedingungen erläutert sind, folgt die Bedruckung der Kappe auf Sollhöhe, die Schaffung des quasi-isotensoiden Zustandes sowie die Verformung von Zelle und Kappe zur DSEC-Struktur.

4.2.1 Bedruckungsprozess

Ein wichtiger Parameter der fertigen Kappe ist deren Höhe, da diese als Bauraum zur Verfügung gestellt und demzufolge von der effektiven Länge der Zelle abgezogen werden muss. Es gilt, das Optimum zwischen Höhe der Kappe und der durch sie für das System verfügbar werdenden Bewegungsenergie zu finden. Basierend auf den in Abschnitt 3.4.1 gemachten Erläuterungen wird die Kappenhöhe als Variable mit den Werten 20 mm , 25 mm und 30 mm untersucht. Die erforderlichen Deformationen, um die nach der Initialbelastung noch nahezu ebene Kappe auf diese Endwerte zu verformen, sind zu groß für einen einzelnen Lastschritt (siehe Absatz 4.1.5). Abhängig von Elementgröße und daraus resultierender Vernetzung werden unterschiedlich viele Einzelbedruckungen in Kombination mit dem „upcoord“-Befehl benötigt.

Um dabei möglichst exakt die vorgegeben Sollhöhen zu erreichen, wird ein Regelprozess verwendet. Dieser unterzieht die Membran wiederholt einer festgelegten Drucklast, bis die Kappenhöhe den vorgegebenen Sollwert übersteigt. Auf diese Überschreitung reagiert der Algorithmus und setzt die Verformungen des letzten Teilschrittes zurück. Es erfolgt eine erneute Bedruckung der Kappe, wobei sich die Belastung aus dem Verhältnis von Ausgangshöhe z_0 sowie Ist- und Sollwert z_1 bzw. z_{\max} gemäß (4.1) berechnet. Durch den Korrekturfaktor von 0,9 wird eine

resultierende Kappenhöhe geringfügig unterhalb des Zielwertes gewährleistet. Anschließend wird die zu verwendende Drucklast für alle folgenden Durchläufe gemäß (4.2) reduziert und der Prozess erneut ausgelöst.

$$p = p \cdot \frac{z_{\max} - z_0}{z_1 - z_0} \cdot 0,9 \quad (4.1)$$

$$p = \frac{p}{5} \quad (4.2)$$

Um eine Endlosschleife zu verhindern, wird eine maximale Anzahl der Iterationen vorgegeben. Als zweites Abbruchkriterium vergleicht der Algorithmus die Differenz zwischen Ist- und Sollhöhe mit einem definierten Toleranzwert. Abbildung 4.6 zeigt den Prozessablauf schematisch. Eine ausführliche Darstellung findet sich in Anhang B (Seite VII).

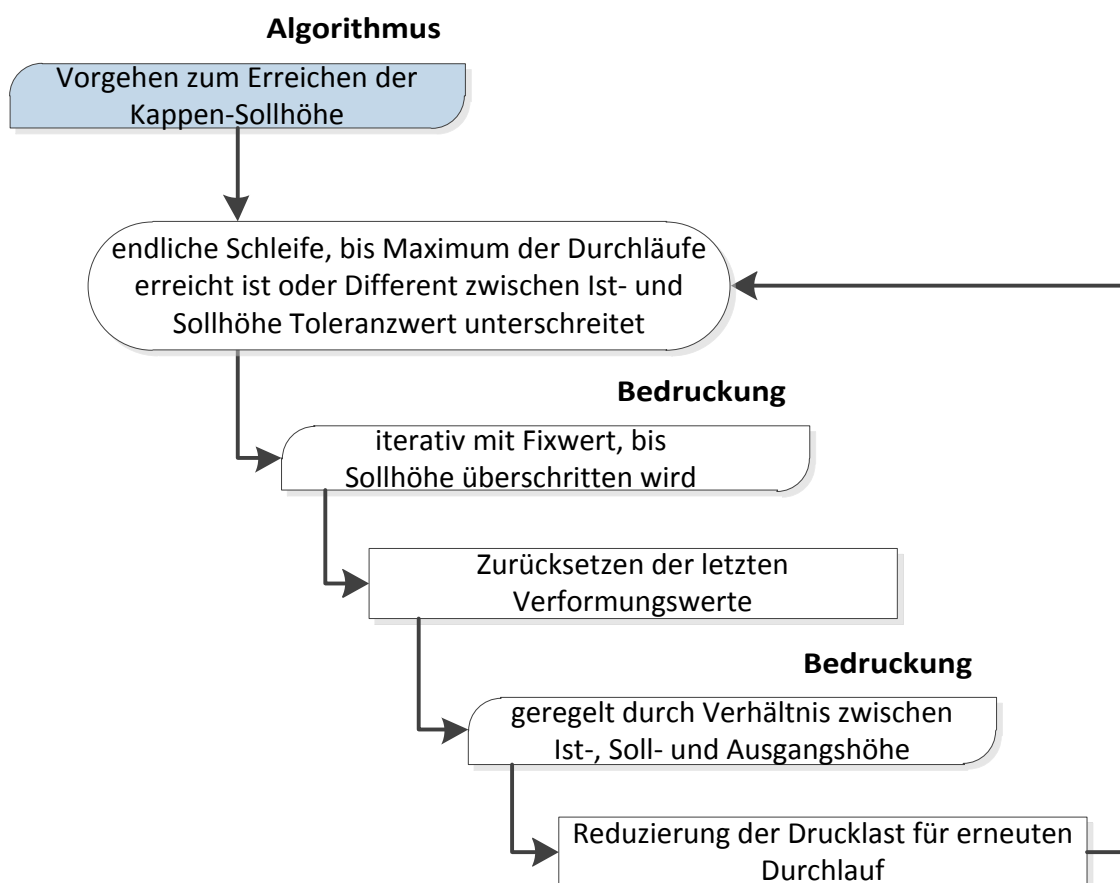


Abbildung 4.6: Ablauf des Bedruckungsalgorithmus

4.2.2 Isotensoid

Nachdem die Kappe bis auf die vorgegebene Höhe aufgebläht ist, muss ausgehend von dieser Geometrie die quasi-isotensoidale Form entwickelt werden. Dies ist nötig, weil bei der Bedruckung der vorangegangenen Schritte kein ausreichend homogenes Spannungsfeld entsteht (siehe Abbildung 4.7). Die unter Abschnitt 4.2.1 erläuterte Schleife wird lediglich durch die erreichte Kappenhöhe als Abbruchkriterium gesteuert, wobei aber kein Ideal bezüglich einer Druckbelastung nach der Kesselformel garantiert wird. Zur Erarbeitung einer solchen Optimalform kommt ein weiterer Regelprozess zum Einsatz. Der verwendete Isotensoid-Algorithmus ist maßgeblich durch Gramüller entwickelt, weshalb an dieser Stelle nur dessen generelles Prinzip erläutert wird. Basierend auf der Arbeit von Bletzinger et al. [10] wird das Verfahren auch als Findung der minimalen Oberfläche bezeichnet. In Analogie zum bereits in Abschnitt 3.4.1 erwähnten Fluidfilm einer Seifenblase wird die Entwicklung eines Flächenminimums angestrebt, welches sich durch ein ausschließlich tangential zur Oberfläche wirkendes und isotropes Spannungsfeld im Gleichgewicht äußert. Dabei sind spezielle Materialkennwerte unerheblich, da sich die Qualität des zu entwickelnden Isotensoids nur an der relativen Spannungsdifferenz innerhalb der Struktur und nicht an absoluten Maximal- oder Minimalwerten bemisst. [10, S. 133]

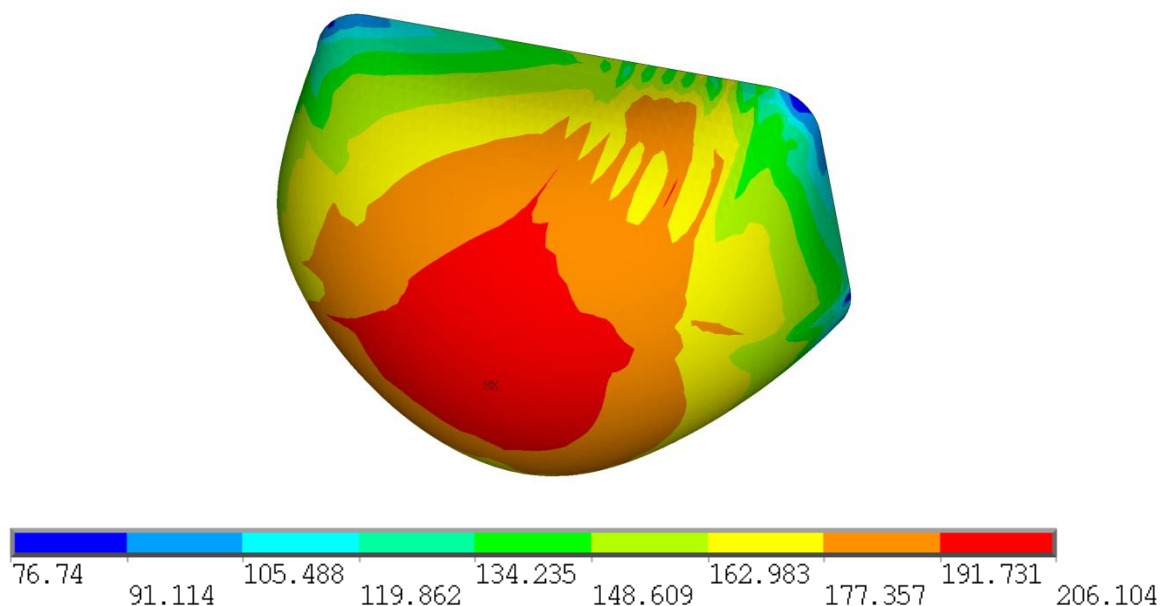


Abbildung 4.7: Spannungsverlauf der Kappe vor Einsetzen des Isotensoid-Algorithmus‘

Die durch Bletzinger et al. entwickelte Methode gilt für vergleichsweise dünne Membranen und treibt eine beliebig geformte Struktur durch Kombination von Belastung und Relaxation iterativ einem isotensoiden Zustand näher. Gramüller greift diesen Ansatz für einen Regelkreislauf innerhalb ANSYS auf. Durch wiederholte Kontraktion der Kappe mittels thermischer Belastung sowie einer gleichzeitigen Bedruckung, um die Sollhöhe nicht zu unterschreiten, entsteht sukzessive die druckoptimale, weil spannungshomogene Form. Die Lastwerte errechnen sich dabei jeweils aus dem vorangegangenen Zyklus, wodurch die relative Spannungsdifferenz der Kappe mit jedem Durchgang reduziert wird. Abbildung 4.8 zeigt, dass eine Differenz unterhalb von 5 % der Absolutwerte bereits nach 5 Iterationen erreicht wird. Berechnungen von mehr als 10 Iterationen sind in Anbetracht der hohen Simulationsdauer (siehe Abschnitt 5.1) und der zu erzielenden Verbesserung nicht sinnvoll.

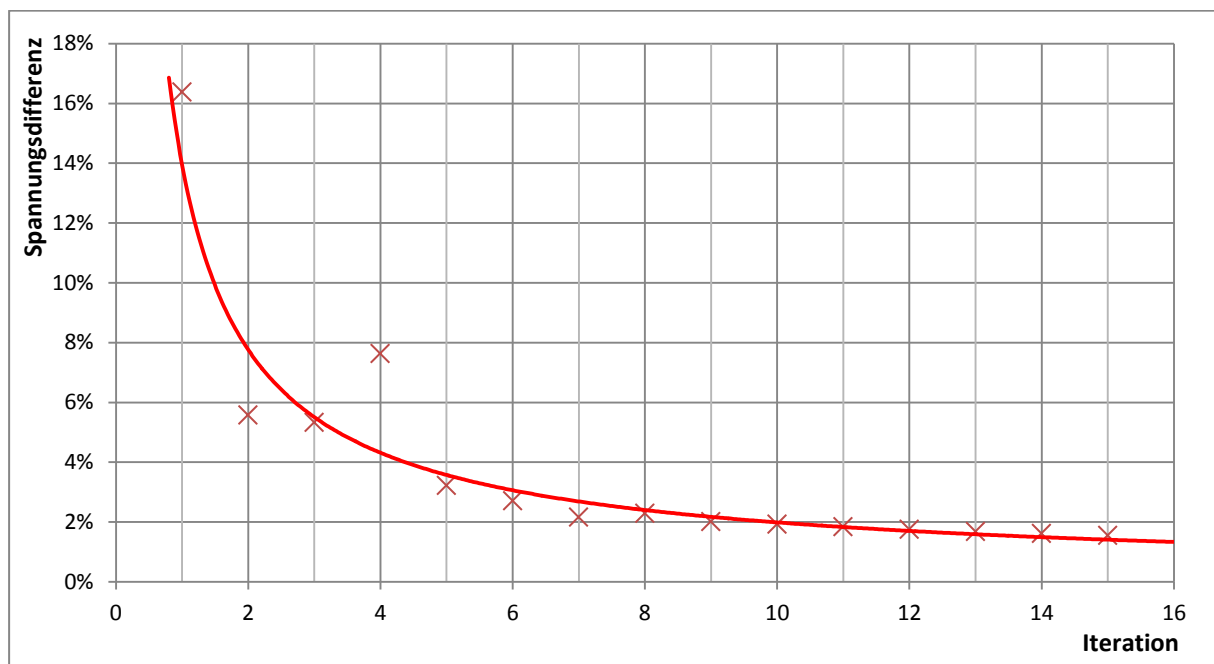


Abbildung 4.8: Einfluss des Isotensoid-Algorithmus auf Spannungsdifferenz der Kappe

4.2.3 Zellverformung

Nachdem durch den Isotensoid-Algorithmus die Kappenform für den Belastungszustand optimiert ist, folgt nun die eigentliche Generierung der verformungsunterstützenden Geometrie.

Dazu werden im Folgenden die Flanken der Zelle durch direkte Verdrehung ihrer Knotenpunkte in die Einbaukonfiguration gebracht. Um die Flankenverdrehung als Starrkörperbewegung simulieren zu können, werden sogenannte „coupled sets“ definiert, durch die ANSYS nur die Freiheitsgrade eines definierten Primärknotens berücksichtigt und auf alle weiteren im Set enthaltenen Knotenpunkte kopiert. So wird die zu lösende Matrixgleichung stark vereinfacht und spart Berechnungszeit [6, S. 299]. Innerhalb der Simulation bedeutet dies eine einheitliche Verdrehung der Flanken als starres Teilstück.

Die quasi-isotensoiden Kappe wird ebenfalls dieser Bewegung unterworfen. In den kontaktierenden Bereichen geschieht dies als direktes Resultat der gemäß Abschnitt 4.1.4 definierten Kontaktbedingung und im Zellinneren aufgrund der Eigensteifigkeit der Kappe. Für diesen Simulationsschritt ist es essentiell, dass ein Falten und Wölben der Kappenoberfläche, wie in Abschnitt 4.2.3 erläutert, begünstigt wird.

An dieser Stelle ist die Verwendung der in Abschnitt 4.1.1 erstellten Schalenelemente mit Membran-Option nicht mehr möglich, weil sie die erforderliche Eigensteifigkeit per Definition nicht darstellen können. Die Instabilität der Struktur verhindert ein Konvergieren und Lösen der Zwischenergebnisse. Die durch Verdrehung der Balkenstruktur entstehenden Momente können von den angrenzenden Kappenelementen nicht aufgenommen werden und ANSYS bricht die Simulation mit Hinweis auf fehlende Plausibilität ab.

Eine Vorspannung ähnlich [8] und Abschnitt 4.1.3 ist innerhalb dieser Umgebung nicht möglich, da es durch das Einbringen einer Temperaturbelastung zur Kontraktion des Materials kommt, welche die vorherigen Bemühungen zur Einhaltung der Sollhöhe und Schaffung einer isotensoiden Form zunichtemacht. Es ist deshalb unumgänglich, die Membran-Option der verwendeten Schalenelemente aufzuheben. Danach bieten sie die nötige Eigensteifigkeit, die Simulation hinreichend zu

stabilisieren. Um eine Biegung der Elemente gegenüber ihrer Dehnung oder Stauchung zu fördern, bleibt nur die Möglichkeit, dies durch passende Vorgabe von Strukturkennwerten zu provozieren. Die nötige Korrelation zwischen Dehn- und Biegesteifigkeit eines Schalen-schnittsegmentes ist dazu entsprechend (4.3) bzw. (4.4) in Abhängigkeit von Elastizitätsmodul E , Materialdicke t und Bauteilbreite b gegeben.

$$\text{Dehnsteifigkeit} = E \cdot A = E \cdot b \cdot t \quad (4.3)$$

$$\text{Biegesteifigkeit} = E \cdot I = E \cdot \frac{b \cdot t^3}{12} \quad (4.4)$$

Dabei wird deutlich, dass sich beide Terme nur durch einen Faktor und den Einfluss der Materialdicke t unterscheiden. Diese geht in die Berechnung der Dehnsteifigkeit linear, in die der Biegesteifigkeit dagegen allerdings kubisch ein. Um die Dehnsteifigkeit im Verhältnis zur Biegesteifigkeit zu minimieren ist nach diesem Zusammenhang eine möglichst geringe Wandstärke zu gewährleisten, da die übrigen Parameter keinen Einfluss besitzen. Dieser Überlegung folgend muss mit fallender Kappendicke die Anzahl der Auffaltungen im Material zunehmen. Die dazu durchgeführte Parameterstudie verifiziert diese Annahme. Abbildung 4.9 zeigt exemplarisch die geometrischen Ergebnisse unter Variation der Wandstärke für verschiedene Kappenhöhen.

Deutlich ist zu erkennen, dass der Faltenwurf des Materials mit sinkender Kappendicke zunimmt. Auch die vorgegebene Sollhöhe hat entscheidenden Einfluss auf die erreichten Resultate. Speziell für Kappen mit einer Höhe von 20 mm wird deutlich, dass infolge der geringen Auswölbung nicht ausreichend Material für eine Vielzahl von Faltungen zur Verfügung steht. Es kommt unter diesen Bedingungen stärker zu unerwünschten Stauchungen und Dehnungen der Kappe. Im Gegensatz dazu zeigen Kappen mit einer Sollhöhe von 30 mm ausgehend vom erreichten Faltenwurf deutlich höheres Potenzial. Die Untersuchung, inwieweit daraus eine verbesserte Energieausbeute resultiert, findet in Abschnitt 6.3 statt. Mit Beendigung der Zellverformung ist der Prozess der Modellierung abgeschlossen, als Resultat liegt die DSEC-Kappe vor.

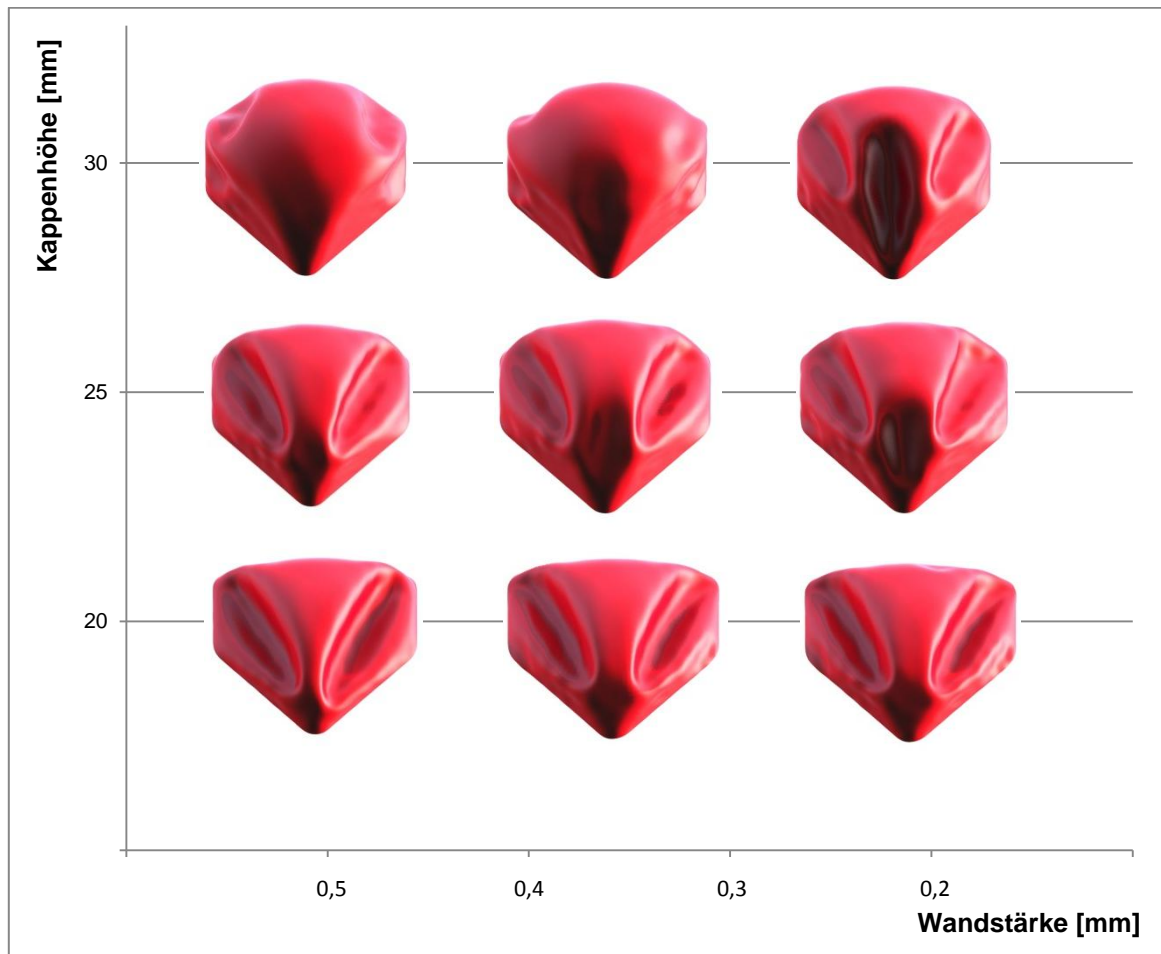


Abbildung 4.9: ausgewählte Kappengeometrien in Abhängigkeit von Sollhöhe und Wandstärke

Anschließend können die verschiedenen erarbeiteten Geometrien durch erneute Bedruckung bewertet werden. Als Referenz für die nachfolgende Simulation wird das geometrische Ergebnis, welches innerhalb der Zellverformung durch Verwendung von 25 mm Sollhöhe und $0,25\text{ mm}$ Wandstärke entstanden ist, verwendet. Äquivalente Kappen mit 20 mm und 30 mm Höhe werden zum Vergleich herangezogen. Zwar ist es auch gelungen, Resultate mit einer Materialdicke von $0,2\text{ mm}$ zu erarbeiten, jedoch weisen diese erhöhte Defizite bezüglich ihrer Symmetrie auf. Da die Ausgangsgeometrie sowie alle Belastung symmetrisch sind, ist diese Beobachtung ein Anzeichen für die steigende Instabilität der Simulation bei sinkender Wandstärke. Rechnungen mit Dicken unterhalb $0,2\text{ mm}$ konvergieren nicht und werden durch ANSYS aufgrund fehlender Stabilität der Struktur abgebrochen. Weiterhin ist zu erwähnen, dass für den Prozess der Zellverformung bei sinkender Wandstärke erhöhte Werte des E-Moduls verwendet werden müssen, um der Simulation durch einen Mindestwert von Biegesteifigkeit die minimal nötige Stabilität zu verleihen.

5 Simulation

Das folgende Kapitel umfasst Erklärungen zur Wahl einer angemessenen Elementgröße sowie deren Einfluss auf die zu erzielenden Ergebnisse und benötigte Rechenzeit. Neben der Beschreibung des finalen Tests der erarbeiteten Kappe, werden auch Überlegungen zu möglichem Optimierungspotenzial innerhalb des Modells diskutiert.

5.1 Elementgröße und Konvergenzstudie

Die verwendete Elementgröße hat entscheidenden Einfluss auf die Richtigkeit der berechneten Ergebnisse. Ein grobes Netz ist nicht dazu in der Lage, alle geometrischen Feinheiten des Modells oder lokale Spannungsspitzen korrekt abzubilden. Allerdings steigt die Anzahl der Elemente quadratisch gegenüber ihrer Größe an. Aus diesem Zusammenhang entspringt das typische Dilemma einer FE-Analyse, möglichst akkurate Ergebnisse mit einem Minimum an rechnerischem Aufwand zu erzeugen. Abschnitt 5.2 erläutert gezielte Maßnahmen, um diesen Konflikt teilweise zu entschärfen. ANSYS selbst [6, S. 25] empfiehlt, die Elementgröße lokal zu variieren, um Details des Modells oder Bereiche von hohem Interesse durch entsprechend kleine Elemente hinreichend genau darzustellen. An großflächigen oder weniger interessanten Arealen kann durch erhöhte Elementgröße ein unnötiger Bedarf an Rechenzeit verhindert werden.

Im aktuellen Modell sind derartige Maßnahmen aufgrund der in Abschnitt 4.1.2 geforderten Netzkriterien nicht realisierbar. Eine variable Elementgröße innerhalb der Kappe ist nicht sinnvoll. Zum einen lässt sich ihr Einfluss auf die durch Verformung zu generierende Kappenform nicht vorhersagen und zum zweiten sind Areale von Interesse noch nicht vor dieser Geometrieschaffung zu identifizieren.

Ein homogenes Netz innerhalb der Membran ist somit einzige Alternative. Durch diese Entscheidung wird automatisch auch das Netz des restlichen Modells definiert. Zwar sind Spannungsverläufe der Zellbereiche nicht von Interesse und auch die großflächigen Areale der Zellflanken lassen eine grobe Vernetzung zu. Die in Abschnitt 4.1.4 erläuterten Kontaktbedingungen erfordern aber eine zur Kappe korrespondierende Elementgröße, da die verwendeten Kontaktelemente sonst nicht

dazu in der Lage sind, Berührungen korrekt zu detektieren. Bei zu großer Differenz der Elementabmessungen kommt es unweigerlich zu unerwünschten Durchdringungen der Kontaktpartner.

Aus den vorangegangenen Gründen ist für das gesamte Modell eine homogene Elementgröße zu verwenden. Zur Wahl einer angemessenen Netzauflösung wird eine Konvergenzstudie durchgeführt, um die Genauigkeit der numerischen Ergebnisse zu prüfen. Für diese werden die Spannungswerte nach Belastung an markanten Stellen des Modells für unterschiedliche Elementgrößen untersucht. Da die Genauigkeit der Ergebnisse mit der Feinheit des Netzes steigt, konvergieren die berechneten Spannungen gegen einen analytischen Idealwert.

Im vorliegenden Modell ist der finale Test der Kappe von höchstem Interesse, weshalb eine Konvergenzstudie der dabei ermittelten Ergebnisse wünschenswert ist. Die Netzauflösung beeinflusst die entstehende Kappengeometrie allerdings maßgeblich, wodurch alle nach der Zellverformung (Abschnitt 4.2.3) ansetzenden Simulationsschritte nicht vergleichbar sind. Des Weiteren ist es kaum möglich, analytisch Werte für einen derart komplexen Belastungsfall zu bestimmen, weil die Auffaltung und erneute Glättung der Oberfläche aus Geometrie, Steifigkeit und Bewegung der Kappe resultieren.

Für eine Konvergenzstudie werden daher einfacher greifbare Zwischenergebnisse aus dem Prozess der Modellierung herangezogen. Konkret wird die durch Bedruckung (Abschnitt 4.2.1) und Isotensoid-Zyklus (Abschnitt 4.2.2) auf Sollhöhe gebrachte Struktur erneut unter Druck gesetzt. Die daraus folgende Axialspannung im isotensoiden Bereich der Kappe sowie die am Übergang zur Balkenkonstruktion eingeleitete Zugkraft lassen sich analytisch durch die Kesselformel (5.1) respektive Beziehung (5.2) überprüfen.

Für den Vergleich von numerischen und analytischen Ergebnissen wird der mittlere Kappendurchmesser nach Isotensoid-Algorithmus gemäß Abbildung 3.6 und infolge der Kontaktbedingungen mit 50 mm abgeschätzt. Drucklast und Wandstärke betragen 0.1 MPa bzw. 1 mm . Aus diesen Annahmen und Vorgaben ergibt sich die Axialspannung wie folgt.

$$\sigma_a = \frac{p \cdot d}{4 \cdot t} \quad (5.1)$$

$$\sigma_a = \frac{0,1 \text{ N/mm}^2 \cdot 50 \text{ mm}}{4 \cdot 1 \text{ mm}}$$

$$\sigma_a = 1,25 \text{ N/mm}^2$$

Die Zuglast kann aus anliegendem Druck p und belasteter Fläche A gemäß (5.2) errechnet werden. Die Oberfläche wird aus den vorhandenen CAD-Daten mittels CATIA V5R20 mit einem Wert von 1927 mm^2 bestimmt.

$$F = p \cdot A \quad (5.2)$$

$$F = 192,7 \text{ N}$$

Tabelle 5.1 zeigt die passend dazu numerisch ermittelten Werte und die jeweilige Abweichung zur analytischen Rechnung bei Variation der Elementgröße. Es ist zu erkennen, dass die Genauigkeit der Ergebnisse mit steigender Auflösung gemäß der Annahme zunimmt.

Tabelle 5.1: Ergebnisse der numerischen Rechnung und Abweichung zum analytischen Wert

Element- größe [mm]	Spannung			Kraft		
	numerische Werte [N/mm ²]	Abweichung		numerische Werte [N]	Abweichung	
		absolut [N/mm ²]	relativ [%]		absolut [N]	relativ [%]
0,5	1,251	0,001	0,08	192,73	0,03	0,02
1,0	1,2521	0,0021	0,17	192,73	0,03	0,02
1,5	1,26025	0,01025	0,82	190,82	1,88	0,98
2,0	1,261	0,011	0,88	190,61	2,09	1,08
2,5	1,267	0,017	1,36	191,02	1,68	0,87
3,0	1,283	0,033	2,64	189,71	2,99	1,55

Dem gegenüber steht ein erhöhter Bedarf an Rechenzeit bei Zunahme der Elemente, weshalb ein sinnvoller Kompromiss zwischen Genauigkeit und Aufwand gefunden werden muss. Tabelle 5.2 listet die nötige Berechnungszeit einzelner Rechenschritte jeweils vor und nach Einsatz der Kontaktbedingungen sowie der Gesamtsimulation. Elementgrößen oberhalb von 3 mm werden nicht untersucht, weil sie die Gelenkbereiche rein geometrisch nicht ausreichend detailliert darstellen können [6, S. 184].

Tabelle 5.2: benötigte Rechenzeit der Simulation

Element- größe [mm]	Elementanzahl		Rechenzeit Einzelschritt		Gesamt- simulation [min]
	ohne Kontakt [-]	mit Kontakt [-]	ohne Kontakt [min]	mit Kontakt [min]	
0,5	27.152	53.968	4,1	45	870
1,0	7.004	13.838	2,5	20	305
1,5	3.249	6.383	2,0	7	120
2,0	1.847	3.607	1,5	4	76
2,5	1.210	2.350	1,0	3	58
3,0	847	1635	0,5	2	35

Die dargestellten Rechenzeiten sind durch ein Dual-Core-System mit 2,1GHz Rechenleistung entstanden und können somit nur qualitative Aussagen erlauben. Die Absolutwerte des Zeitbedarfs lassen sich mit leistungsfähigeren Systemen oder durch den Zusammenschluss zu Computerclustern entsprechend verringern. Die in Abbildung dargestellte Verbesserung der Rechenergebnisse sowie der damit einhergehenden Anstieg der Simulationszeit lassen Aussagen zu einer optimalen Elementgröße zu. Im vorliegenden Fall ist diese mit 1mm anzunehmen, da unter dieser Konfiguration vollkommen ausreichend genaue Resultate (0,02 % Abweichung) bei vertretbarem Zeitaufwand (305 Minuten für vollständige Simulation) zu erzielen sind.

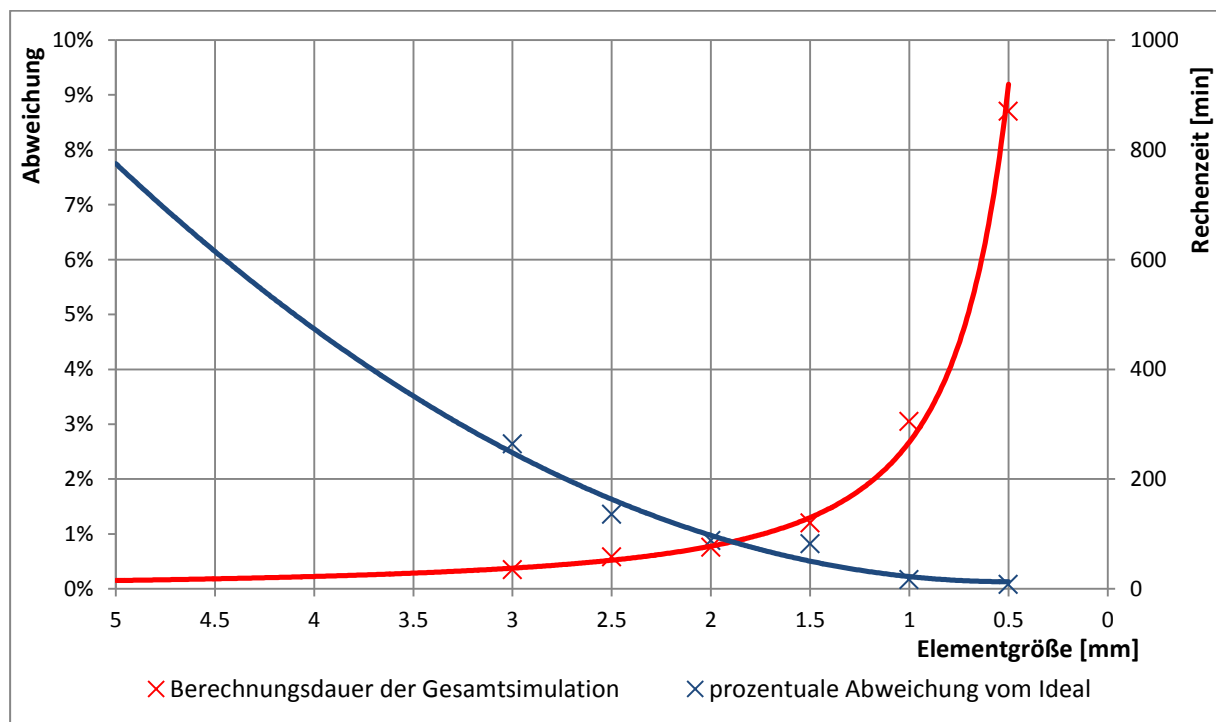


Abbildung 5.1: Rechenzeit und Abweichung der Simulation

5.2 Optimierungspotenzial

Der im vorangegangenen Abschnitt aufgeführte und teilweise enorme Rechenaufwand, nötig, um mit der Zellverformung die Modellierung einer einzelnen Geometrie abzuschließen, verlangt nach Maßnahmen zur Reduzierung. Dieses Kapitel untersucht deshalb alternative Möglichkeiten, den Bedarf an Rechenzeit durch gezielte Änderung des Modells zu verringern.

5.2.1 Elementtypen

Den mit Abstand größten Einfluss auf die benötigte Rechenleistung hat die Wahl der verwendeten Elemente eines Modells. Es gilt, ein Minimum geometrisch möglichst simpler Elementtypen zur adäquaten Darstellung des vorliegenden Sachverhaltes zu verwenden. Können räumliche Problemstellungen durch ein ebenes Modell approximiert werden, ist die Ersparnis enorm. Der Einsatz von Volumenkörpern sollte nur erfolgen, wenn tatsächlich einzig diese dazu in der Lage sind, die Gegebenheiten akkurat abzubilden. Der Zuwachs an zu berechnenden Elementen steigt in einem Flächenmodell quadratisch gegenüber einem Linienmodell. Werden Volumenkörper verwendet ist das Verhältnis folglich kubisch und zieht entsprechend erhöhte Rechenzeit nach sich. Es ist daher sinnvoll, das zu bearbeitende Problem eingehend auf mögliche Vereinfachungen zu untersuchen. Eine Balkenbiegung mithilfe eines Volumenmodells zu simulieren, ist beispielsweise unnötig, da ANSYS für Linienelemente wie BEAM und PIPE eine Vielzahl von Parametern bietet, welche eine Beschreibung der Querschnittsgeometrie rein analytisch ermöglichen.

Im vorliegenden Fall wird die zugrundeliegende Mechanik der Zelle durch passende Balkenelemente realisiert (siehe Abschnitt 4.1.1). Der Rest des Modells wird durch Schalenelemente dargestellt, und so auf Oberflächen von Interesse beschränkt. Dadurch werden räumliche Abgrenzung und Kontaktverhalten auch ohne den Einsatz von Volumenelementen realitätsnah dargestellt. Diese Vorgehensweise beschreibt die Problematik des Zellverschlusses in seiner geometrisch simpelsten Form. Durch die nötigen Vereinfachungen entstehen marginale Abweichungen zum Realfall, welche angesichts der ohnehin enormen Simulationszeit aber als akzeptabler Kompromiss zu sehen sind.

5.2.2 Halbes Modell

Eine in der FE-Analyse mögliche Vorgehensweise zur Minimierung von Modellierungs- und Simulationsaufwand ist die gezielte Nutzung von Symmetriebedingungen. Rotationssymmetrische Probleme lassen sich auf Ausschnitte oder ebene Querschnitte reduzieren. Achssymmetrie macht eine durch die Achse geteilte Modellierung möglich und senkt die Berechnungsdauer auf diese Weise im einfachsten Fall um die Hälfte. Die so gewonnen Kapazitäten können beispielsweise in Form eines feineren Netzen zur Ergebnisverbesserung genutzt werden. [6, S. 23]

Das in dieser Arbeit untersuchte System weist sowohl geometrisch, als auch in Belastung eine vertikale Symmetrieachse auf. Eine Modellierung der halben Geometrie ist daher zulässig und wird zu Vorabuntersuchungen oder für die zügige Prüfung von Lastfällen und einzelnen Lösungsschritten verwendet. Die unter Abschnitt 3.1 beschriebene Grundproblematik beschränkt sich aber nicht auf eine einzelne Zellform, sondern sieht den Verschluss verschiedener Geometrien vor, welche teilweise keine Symmetrie aufweisen. Mit Rücksicht auf die als Hauptanforderung definierte Übertragbarkeit auf weitere Zellformen wird eine Halbierung des Modells in der vorliegenden Arbeit verworfen. Dieser Kompromiss wird zugunsten des Automatisierungsgrades und entgegen einer möglichen Verkürzung der Simulation entschieden.

5.2.3 Selektive und verzögerte Kontaktdefinition

Abschnitt 4.1.4 erläutert den erhöhten Berechnungsaufwand infolge der Verwendung von Kontaktelementen und Tabelle 5.2 zeigt den direkten Einfluss auf die Simulationszeit. Es ist daher wünschenswert, die Definition von Kontaktbedingungen räumlich und zeitlich auf ein Minimum zu beschränken. Abbildung 4.5 zeigt, dass zwar die gesamte Kappen- und Zellfläche als Kontaktpartner erstellt sind, aber auch nach Erreichen des quasi-isotensoiden Zustandes nur durch einen Bruchteil der Elemente tatsächlich Kontaktinformationen auszuwerten sind. Wie in [9, S. 24] erläutert, können eine exakte Identifikation der voraussichtlich kontaktierenden Bereiche sowie eine Limitation der Kontaktdefinition darauf zu erheblicher Zeitersparnis führen. Im vorliegenden Fall ist ein Einsatz von Kontaktpartner ausschließlich im Randbereich der Kappe denkbar. Diese Vorgehensweise erfordert

allerdings ein genaues Abschätzen der betroffenen Areale und lässt sich kaum auf weitere Zellformen übertragen. Mit Hinblick auf die geforderte Automatisierbarkeit des Lösungskonzeptes wird deshalb auf eine derartige Unterteilung der verschiedenen Flächen verzichtet.

Im Kontrast dazu ist eine zeitliche Beschränkung der Kontaktdefinition im aktuellen Modell mit einfachen Mitteln umzusetzen. Das Aufblähen der Kappe geschieht durch iterative Bedruckung aus einer ebenen Membran heraus (siehe Abschnitt 4.2.1). Dabei kommt es während der Initialbelastung sowie den ersten vier Iterationen grundsätzlich nicht zum Kontaktieren zwischen Zelle und Kappe. Ein Einsatz von Kontaktelementen bis zu diesem Zwischenergebnis ist daher unnötig. Durch die verzögerte Definition der Kontaktpartner werden inklusive der Initiallast sechs Teilrechnungen beschleunigt gelöst, woraus sich in Abhängigkeit der Elementgröße jeweils die in Tabelle 5.2 aufgelistete Zeitersparnis ergibt.

5.3 Test der Kappe

Um zu verifizieren, ob durch die erarbeiteten Kappenformen tatsächlich eine Unterstützung der Zellverformung erreicht wird, ist die erneute Bedruckung des Gesamtsystems nötig. Dabei lassen sich auch die verschiedenen Varianten vergleichen und bewerten. Ausschlaggebend für die Bestätigung des Prinzips sowie die Qualität einer einzelnen Lösung ist das Potenzial der Kappe, während der Bewegung Energie an die Zelle abzugeben. Als passender Kennwert wird das durch die Kappe abgegebene Drehmoment betrachtet. Diese Untersuchung kann unmöglich in experimenteller Umgebung durchgeführt werden, da eine Bedruckung der Kappe ohne Zelle nicht realisierbar ist, ohne das Gesamtkonzept zu stören. Umgekehrt hat eine Untersuchung beider Komponenten im Verbund zur Folge, dass die Zelle unter Druck selbständig in ihre Betriebskonfiguration wechselt und sich der Anteil der Kappe an dieser Bewegung nicht exakt identifizieren lässt.

Innerhalb der FE-Analyse ist zwar eine Untersuchung der Kappe allein auch nicht möglich, da diese bei einer Bedruckung zwangsläufig über die, im Modell durch die Zellelemente dargestellten, Bauraumbeschränkungen verformt wird. Dennoch ist numerisch ein abstrakterer Ansatz denkbar. Zum Test der Kappe wird diese bedruckt und in einem anschließenden Prozess die Zelle durch Verdrehung der Flanken in

den Belastungszustand gebracht. Es handelt sich dabei um eine inverse Form des in Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Vorganges der Zellverformung unter zusätzlicher Applikation einer Drucklast. Anschließend werden aus den Zwischenlösungen dieser Bewegung Werte für die Flankenverdrehung und die in die Lagerung eingeleiteten Momente ausgelesen. Um den Anteil der Kappe im System zu isolieren, wird die Zelle allein derselben Deformation unterzogen und ebenfalls die resultierenden Momente ermittelt. Der Beitrag der Kappe zur Deformation ergibt sich folglich aus der Differenz zwischen den Resultaten der Simulation von Gesamtsystem und reiner Zelle.

5.4 Übertragung in CAD-Format

Weil die Form der Kappe während der ANSYS-Simulation ausschließlich als deformiertes Netz generiert wird, ist für eine weiterführende Verwendung dieser Geometriedaten der Export in ein CAD-übliches Format erforderlich. Zu diesem Zweck bietet ANSYS innerhalb der Workbench die Möglichkeit, Netzdaten zu importieren und diese aufzubereiten. Die Verformung des Modells wird mit dem zuvor erläuterten „upcoord“-Befehl auf das Netz übertragen und die Geometrie dann durch das Kommando „cdwrite“ in einer Ergebnisdatei gesichert. Anschließend können die Netzdaten mithilfe des Finite-Element-Modeler in die Workbench importiert werden. Innerhalb dieses Moduls ist die Rückführung des verformten Netzes von einer Punktwolke zu einer dreidimensionalen Schalengeometrie mit geglätteter Oberfläche möglich, welche sich dann in ein sogenanntes Parasolid-Modell übertragen lässt. Der FE-Modeler ist allerdings nicht dazu in der Lage, diese Daten in ein CAD-Format zu konvertieren. Für diesen letzten Schritt ist die Verknüpfung zum Geometry-Modul erforderlich. Hier kann der Parasolid wiederum als neue Geometrie importiert und aus dem Modul heraus im Format IGES exportiert werden. Diese Datei kann beliebig in CAD-Systemen geladen und bearbeitet werden. Abbildung 5.2 zeigt den Ablauf des Prozesses mit den nötigen Einzelschritten sowie den entsprechenden Modulen innerhalb ANSYS classic und Workbench.

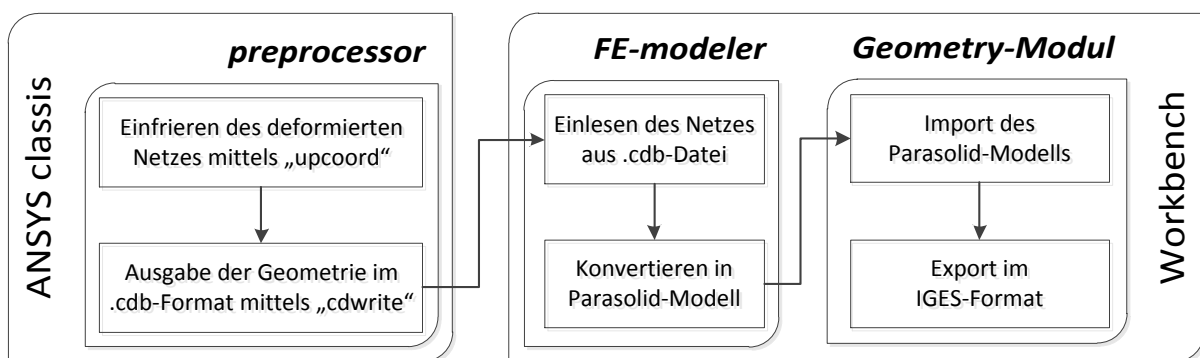


Abbildung 5.2: Ablauf für CAD-Export des deformierten Netzes

6 Ergebnisse

Die endgültig zu fertigende Kappe soll ihre Formänderung hauptsächlich durch energiearmes Biegen erreichen. Das in Abschnitt 4.2.3 erarbeitete Formideal bietet dazu ausreichend Materialfalten, stellt aber eine reine Schalengeometrie dar und ist ausschließlich durch Kennwerte ohne Bindung an einen tatsächlichen Werkstoff generiert. Für einen aussagekräftigen Test der Kappe ist eine Änderung des Modells bezüglich Wandstärke und Werkstoffeigenschaften zu plausiblen Werten erforderlich, um ein möglichst realitätsnahes Bauteil abzubilden.

6.1 Wandstärke und Material

Bezüglich der Lastaufnahme durch die Kappe muss der zu verwendende Werkstoff die auftretenden Spannungen ertragen können und gleichzeitig die teilweise sehr großen Verformungen zulassen. Merkmale wie Reißfestigkeit und Reißdehnung müssen dieser Forderung entsprechen.

Um dem DSEC-Konzept zu genügen, werden für die theoretische Werkstoffwahl die folgenden Annahmen getroffen. Weist das Kappe eine zu hohe Steifigkeit auf, reicht die Belastung nicht aus, die in der Formfindung (Abschnitt 4.2) erarbeiteten Auffaltungen aus der Oberfläche zu glätten. Der als energetisch günstig ermittelte Isotensoidzustand wird nicht erreicht und die Kappe kann ihr Potenzial nicht voll ausschöpfen.

Besitzt der gewählte Werkstoff allerdings nicht genügend Festigkeit, so haben die eingebrachten Spannungen zu große Dehnungen zur Folge und die Kappe wird über die entwickelte Form und Sollhöhe hinausgetrieben. Der quasi-isotensoiden Zustand wird noch vor Erreichen der Maximallast überschritten und es kommt im Anschluss zu unerwünschten Streckungen, welche die Bewegung der Zelle nicht fördern, sondern behindern. Diese Konstellation mindert den Wirkungsgrad des Systems ebenso und ist somit auch zu vermeiden.

Abschließend werden in Anbetracht der komplexen Freiformgeometrie mögliche Fertigungsprozesse beschränkt. Denkbar sind Verfahren aus den Bereichen Gießen, Spritzgießen, Laminieren, Tiefziehen oder Rapid Prototyping, wodurch wiederum eine Werkstoffauswahl limitiert wird.

Sowohl das Streben nach einem möglichst hohen Biegeanteil der Bewegung, als auch die zu ertragenden Spannungen werden ausschließlich durch die eingesetzte Wandstärke bestimmt, wobei ihr Einfluss auf beide Forderungen gegenläufig ist. Für ein Verhältnis der Steifigkeiten zugunsten von Biegung ist nach Beziehung (4.3) bzw. (4.4) eine geringe Kappendicke wünschenswert, welche gemäß Kesselformel (5.1) aber erhöhte Spannungen zur Folge hat und somit steifere Materialien erfordert.

Der resultierende Zielkonflikt ist in Abbildung 6.1 ersichtlich. Dargestellt sind das Verhältnis von Biege- und Dehnsteifigkeit sowie die entstehende Axialspannung im quasi-isotensoiden Bereich der Kappe in Abhängigkeit der Wandstärke. Die Spannungskurve repräsentiert eine Bedruckung durch 1 MPa bei einem Kappendurchmesser von 50 mm .

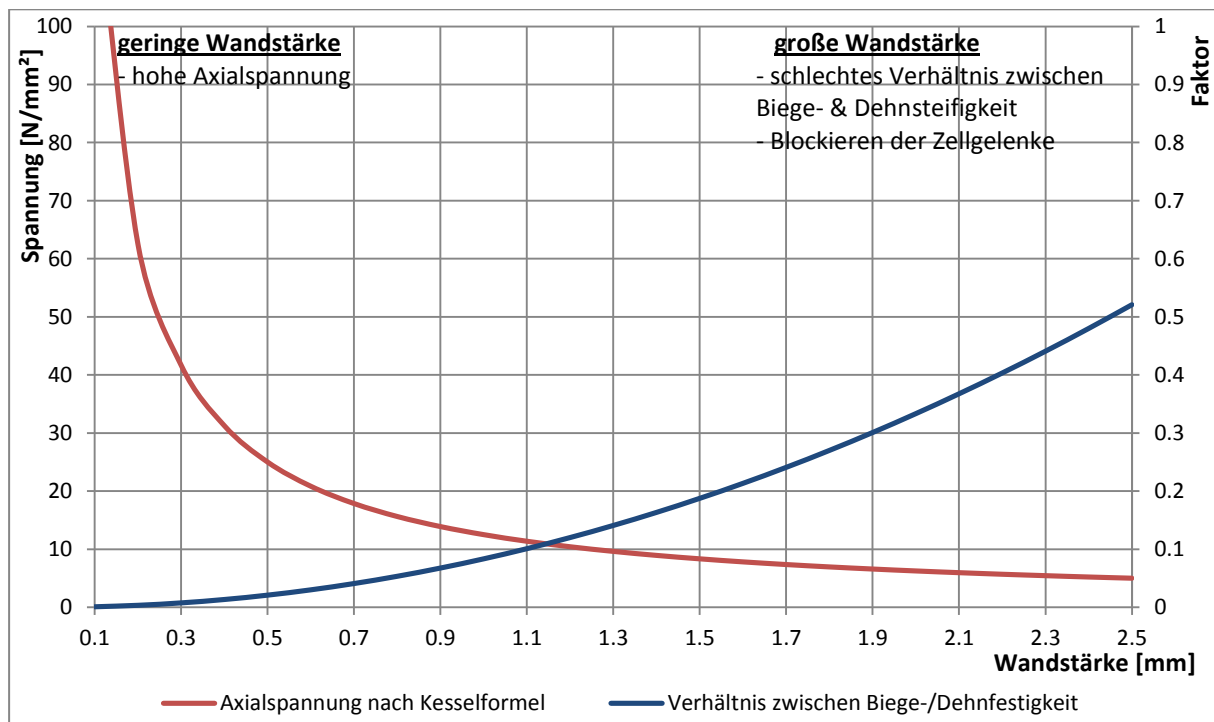


Abbildung 6.1: Darstellung entscheidender Faktoren in Abhängigkeit der Wandstärke

Zu sehen ist, dass eine in Wandstärke überdimensionierte Lösung zwar die zu erwartenden Spannungswerte senkt, Biegung aber nicht ausreichend begünstigt. Des Weiteren blockiert eine Kappendicke deutlich oberhalb der minimalen Zellstärke von $0,8\text{ mm}$ bei späterem Einbau die Bewegung der Zelle durch unnötige Aufdickung innerhalb der Gelenkbereiche. Im Gegensatz dazu tendiert eine sehr dünne, membranähnliche Kappe deutlich stärker zur Deformation durch Biegung, muss aber einen exponentiellen Anstieg der Spannungsbelastung ertragen. Mögliche

Materialien sind dann im Bereich der Metalle zu suchen und resultieren in Kappendicken, welche innerhalb dieser Arbeit nicht realistisch zu fertigen sind. Für die Schaffung eines Probekörpers liegen deshalb deutlich weniger steife Kunststoffe und deren Faserverbundvarianten im Fokus der Werkstoffwahl. Gemäß dieser Überlegung wird die geeignete Wandstärke auf 1 mm geschätzt. Sie gewährleistet Biegung als dominante Art der Deformation und führt zu einer moderaten Axialspannung von $12,5\text{ N/mm}^2$.

Durch die Festlegung einer Wandstärke verbleibt nach Formulierung (4.3) nur der Elastizitätsmodul als variable Einflussgröße auf die Kappensteifigkeiten. Im folgenden Abschnitt wird dieser innerhalb der Simulation des Kappentests variiert und die entstehende Bedruckungsgeometrie sowie die an die Zelle übertragenen Momenten untersucht, um ein Optimum zu erarbeiten. Als sekundäres Kriterium werden reale Werkstoffe und deren Merkmale wie Reißfestigkeit und Reißdehnung mit den auftretenden Spannungen abgeglichen, um die Realisierbarkeit der Lösung sicherzustellen.

6.2 Referenzkappe

Der Bereich zu untersuchender Elastizitätsmoduln wird mit einer Spanne von 50 N/mm^2 bis 500 N/mm^2 festgelegt, die entstehenden Dehnungen liegen also zwischen 25 % und 2,5 %. Ziel ist eine Kappenvariante, welche bei Bedruckung durch $0,1\text{ MPa}$ eine Flankenverdrehung von mindestens 8° erreicht, um unter ähnlichen Bedingungen wie die Zelle zu konvergieren (siehe Abbildung 6.5). Als zweiter entscheidender Aspekt darf die Kappe auch unter dem Maximaldruck von 1 MPa nicht übermäßig aus der quasi-isotensoiden Geometrie getrieben wird. Die Ideallösung konvergiert unter möglichst geringem Druck gegen den Belastungszustand der Zelle, um diese zeitig zu unterstützen. Eine erhöhte Bedruckung sollte dabei nur die Energieausbeute steigern und gleichzeitig den geometrischen Endzustand möglichst wenig beeinflussen. Die Studie wird ausschließlich an der in Abschnitt 4.2.3 als final erarbeiteten Kappengeometrie durchgeführt.

Die so erhaltenen Ergebnisse bezüglich des verfügbaren Drehmoments entlang der Kappenkanten sind sehr umfangreich, da für jede Lösung eine Vielzahl von Zwischenschritten nötig ist. Die Resultate werden als separate Textdateien für jede

erfolgreiche Kombination in einer Datenbank gesichert und können mit Hilfe eines Makroprogrammes in Microsoft Excel eingelesen und untereinander beliebig verglichen werden. Abbildung 6.2 zeigt eine Auswahl der entstehenden Momentkurven für variable Elastizitätsmoduln unter konstantem Druck von $0,1 \text{ MPa}$ und einer Wandstärke von 1 mm .

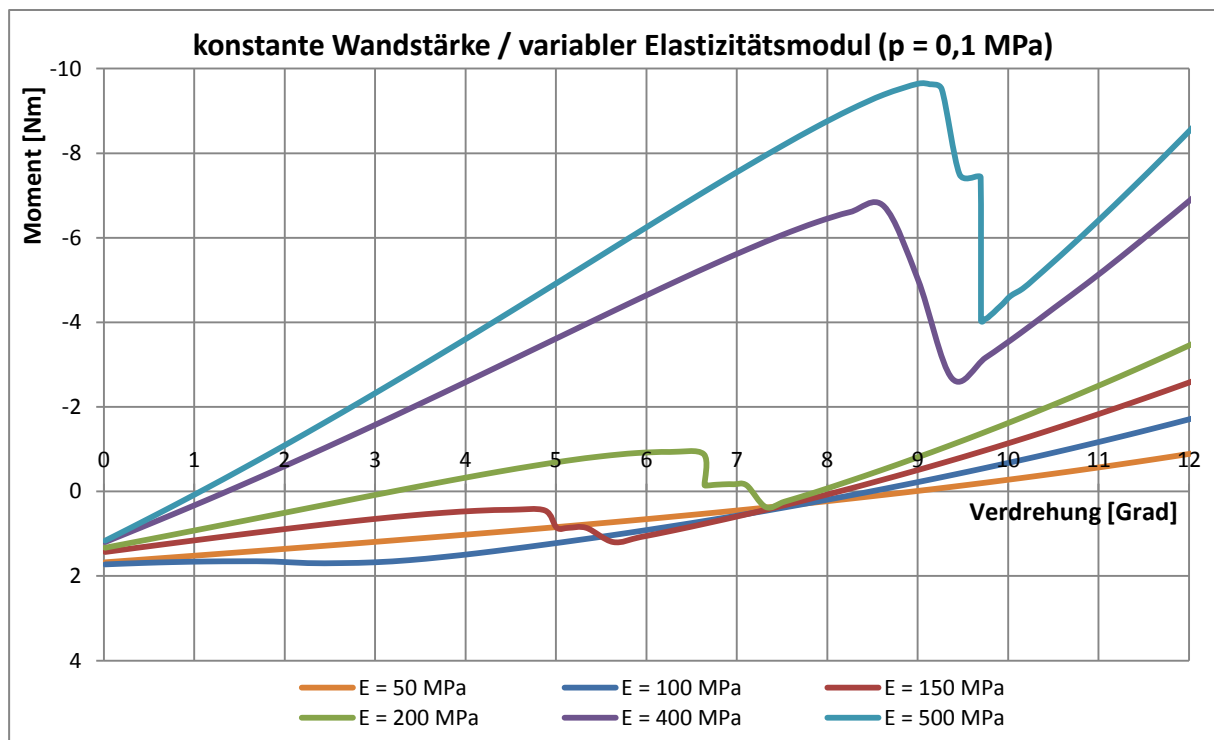


Abbildung 6.2: durch die Kappe abgegebenes Drehmoment ($t = 1 \text{ mm}$, $p = 0,1 \text{ MPa}$)

Die in den Darstellungen auffällige Unstetigkeit der Drehmomente deutet auf eine Instabilität des Systems hin. Eine Auswertung der Bewegungssimulation in ANSYS zeigt, dass die Umbrüche der Momentverläufe aus dem sprunghaften Glätten der Oberflächenfaltungen resultieren. Der aufgebrachte Druck reicht für Kombinationen einer Wandstärke von 1 mm und Elastizitätsmoduln oberhalb von 50 MPa nicht aus, um die Kappe bereits innerhalb ihrer Einbaukonfiguration zu glätten. Der Anstieg der Graphen korrespondiert mit dem eingesetzten Elastizitätsmodul und ist plausibel. Ein frühzeitiger Nulldurchgang bedeutet, dass die Kappe mit steigender Flankenverdrehung kein Moment in das System einbringen kann, sondern im Gegenteil Energie aufnimmt. Für eine weitere Verformung wird die Bewegung der Zelle zur treibenden Kraft, und beginnt, die Kappe in ihre Betriebsform zu deformieren. Werden in diesem Zuge die eingebrachten Faltungen ausreichend geebnet, kommt es zum sprunghaften Wechsel der Kappe in den quasi-isotensoiden Zustand infolge der

anliegenden Drucklast. Erfolgt dieser Umbruch noch vor einem Nulldurchgang, besitzt die Kappe zwar über einen vergleichsweise weiten Bereich der Bewegung eine verformungs-unterstützende Wirkung, kann aber ihr Potential keineswegs optimal nutzen. Allein der dargestellte Verlauf für 50 MPa ist kontinuierlich und fördert die Zellbewegung bis zu einer Flankenverdrehung von ca. 9°.

Wie in Abbildung 6.3 zu sehen ist, lässt sich derselbe Effekt auch bei konstantem Elastizitätsmodul und Variation der Wandstärke beobachten. Er ist damit unmittelbare Folge einer zu hohen Steifigkeit der modellierten Kappe und bestätigt die zuvor in Abschnitt 6.1 gemachten Annahmen. Weitere Darstellungen mit anderen Material-Wandstärke-Kombinationen zur Verifikation dieser Beobachtung finden sich in Anhang B1 (Seite VIII)

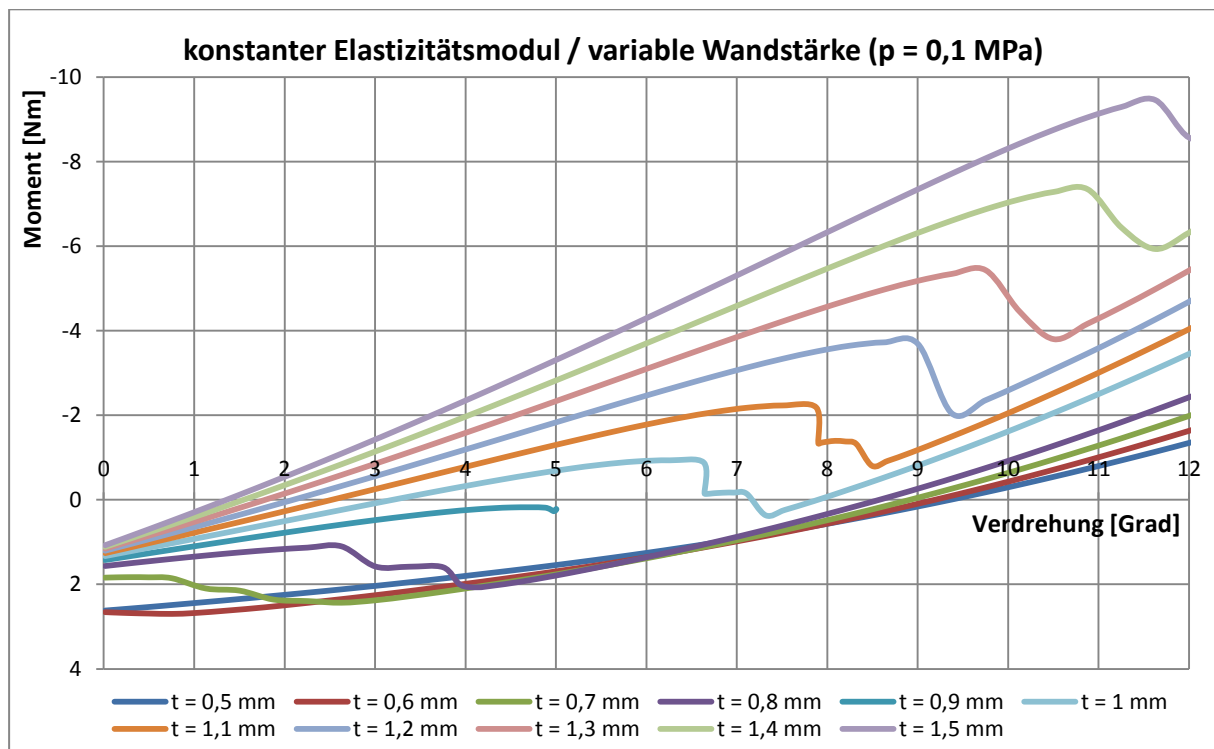


Abbildung 6.3: durch die Kappe abgegebenes Drehmoment (E-Modul = 200 MPa, p = 0,1 MPa)

Durch einen Vergleich der Ergebnisse aller gemachten Simulationen untereinander, wird für die zuvor festgelegte Wandstärke von 1 mm das Optimum des Elastizitätsmoduls mit 50 MPa identifiziert. Diese Kombination erfüllt die Bedingung von größtmöglicher Unterstützung der Zelle während ihrer Bewegung. Abbildung 6.4 zeigt die entstehenden Momentverläufe bei Bedruckung dieser Variante mit bis zu 1 MPa. Dabei ist zu bemerken, dass alle Kurven unabhängig von der Belastung

Nulldurchgänge bei etwa 9° aufweisen und bis zu dieser Flankenverdrehung zur Verformung der Zelle beitragen. Der nahezu identische Schnittpunkt aller Graphen markiert dabei das Erreichen des quasi-isotensoiden Zustandes und die für die Kappe energetisch günstigste Konfiguration unter Druck. Eine Erhöhung der Drucklast bis 1 MPa führt nicht zu einer Änderung der Endgeometrie sondern maximiert stattdessen das verfügbare Moment während der gesamten Verformung, wodurch eine der in Abschnitt 6.1 definierten Kernforderungen erfüllt ist. Erst bei einer Verformung der Zelle über einen Flankenwinkel von 9° hinaus, nimmt die Kappe selbst Energie aus dem System auf, um der Bewegung zu folgen und ihren eigenen Konvergenzzustand zu überschreiten. Die Kontinuität der gezeigten Graphen deutet auf ein Glätten der Kappenoberfläche bereits unterhalb einer Belastung von $0,1 \text{ MPa}$. Eine Darstellung zu Drucklasten im Bereich unterhalb von $0,1 \text{ MPa}$ findet sich im Anhang B2 (Seite XI) und weist dazu passend die zuvor erklärte Unstetigkeit auf. Eine Auswertung aller Momentverläufe und der entsprechenden Nulldurchgänge erlaubt Aussagen über die durch die Kappe erreichte Endkonfiguration in Abhängigkeit der Drucklast. Abbildung 6.5 stellt diese Ergebnisse als Graph zusammen mit der äquivalenten Konvergenzkurve der von Boblenz entwickelten Zelle dar [4, S. 38].

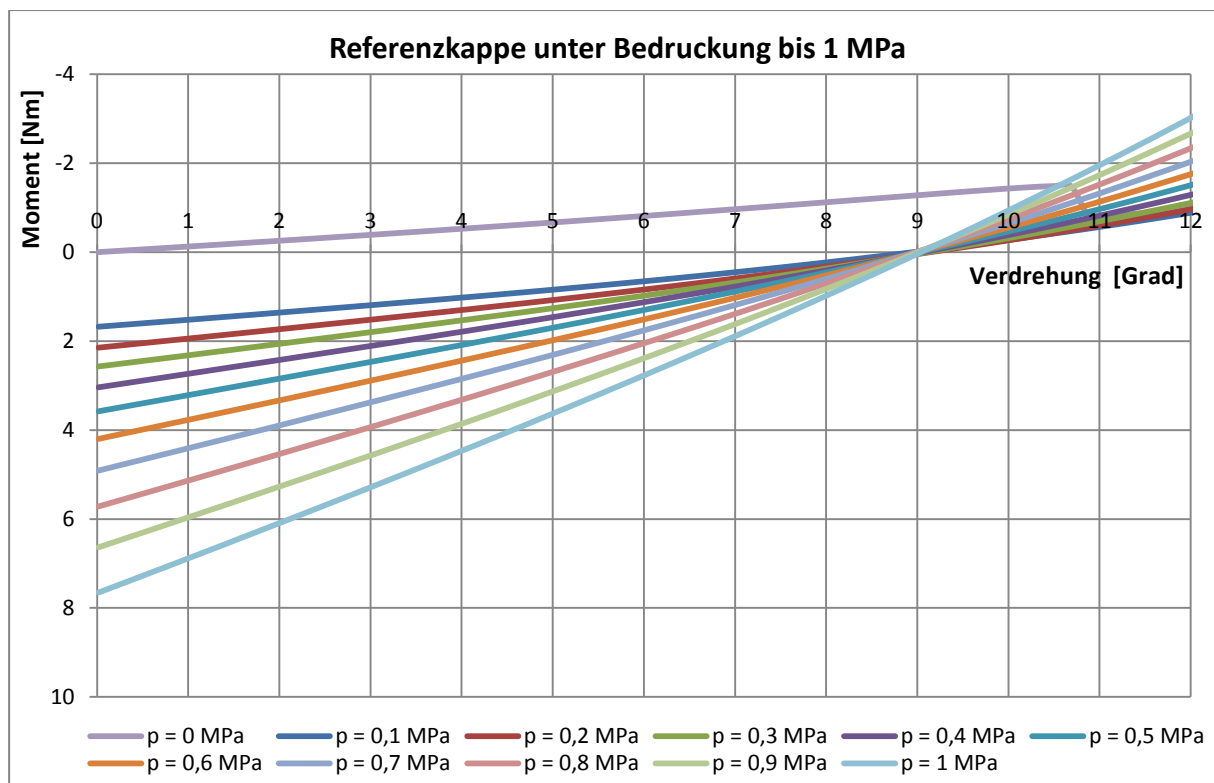


Abbildung 6.4: durch die Kappe abgegebenes Drehmoment (E-Modul = 50 MPa; t = 1 mm)

Es wird deutlich, dass es die erarbeitete Material-Wandstärke-Kombination es der Kappe ermöglicht, das Verhalten der Zellen über den gesamten Bewegungsbereich nahezu identisch nachzuempfinden.

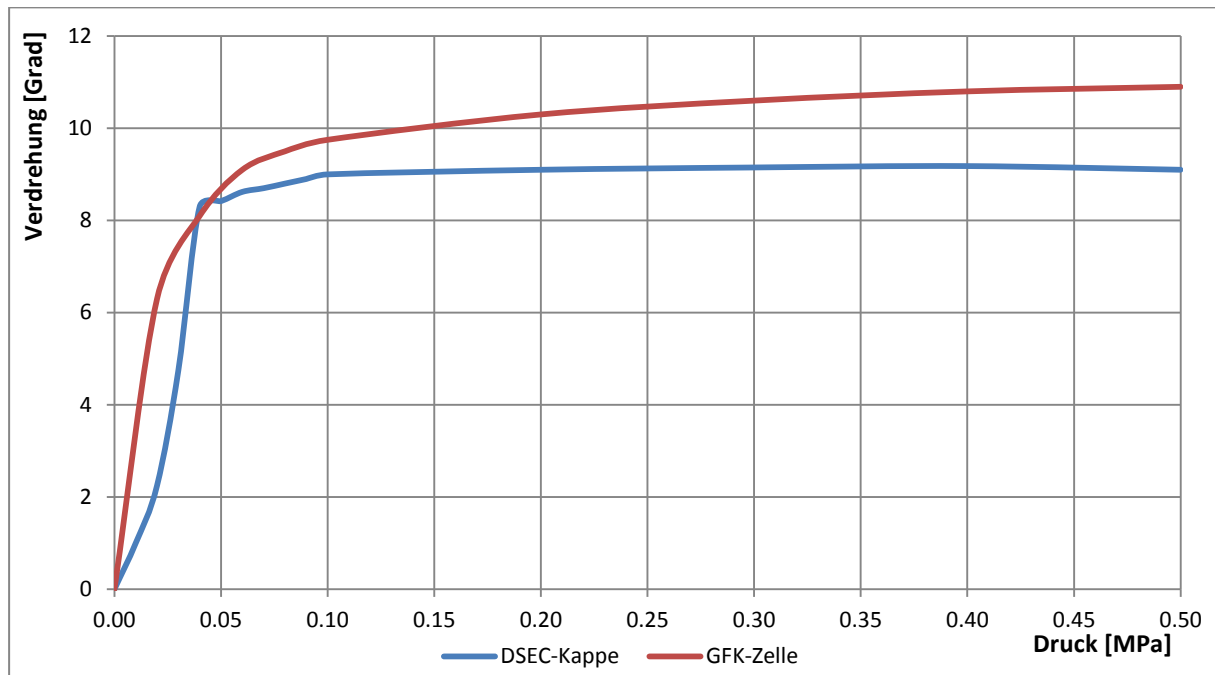


Abbildung 6.5: Konvergenzkurve für DSEC-Kappe und GFK-Zelle nach [4. S, 38]

6.3 Vergleich unterschiedlicher Kappenhöhen

Nach der Festlegung von Wandstärke und Material sowie der Bestätigung des DSEC-Konzeptes, erfolgt ein Vergleich der geschaffenen Lösung mit den verbleibenden, unter Abschnitt erarbeiteten Kappen alternativer Sollhöhe. Um eine Evaluation zu gewährleisten, werden jene Ergebnisse herangezogen, deren Geometrie identisch zu der der Referenzkappe auf Vorgabe einer Wandstärke von $0,25\text{ mm}$ innerhalb des Prozesses der Zellverformung basieren (Abschnitt 4.2.3). Die resultierenden Schalenformen für Kappenhöhen von 20 mm , 25 mm und 30 mm finden sich in Abbildung 6.6.



Abbildung 6.6: Kappengeometrien für Sollhöhen von 20 mm , 25 mm und 30 mm (v.l.n.r)

Für eine Simulation ähnlich Abschnitt 6.2 werden Geometrien mit der Realwandstärke (1 mm) und dem Elastizitätsmodul (50 MPa) der Referenzkappe modelliert und gleichermaßen belastet. Abbildung 6.7 zeigt dazu die entstehenden Momentverläufe für eine Bedruckung der drei Varianten von jeweils $0,1\text{ MPa}$ und $0,5\text{ MPa}$. Es wird deutlich, dass die Referenzkappe mit 25 mm tatsächlich bezüglich ihrer Höhe ein Optimum darstellt. Zwar bietet die Kappenvariante mit 30 mm unter $0,5\text{ MPa}$ zu Beginn der Bewegung das größte Verformungsmoment, weist aber auch eine höhere Eigensteifigkeit auf, welche sich im Anstieg der Kurve äußert. Es kommt zu einem früheren Nulldurchgang und einer verminderten Unterstützung der Zelldeformation. Für einen Druck von $0,1\text{ MPa}$ stellt diese Kappe die schlechteste Lösung im Vergleich dar. Für die Variante von 20 mm Sollhöhe zeigen die Graphen exakt inverses Verhalten. Sie ist bei $0,1\text{ MPa}$ überlegen, bietet aber mit steigender Bedruckung vergleichsweise wenig Momentzuwachs und fällt zurück. Die Referenzkappe mit 25 mm fügt sich jeweils zwischen die übrigen Graphen und bestätigt somit die in Abschnitt 3.4.1 dargelegten theoretischen Annahmen einer idealen Sollhöhe auf Basis der Kesselformel.

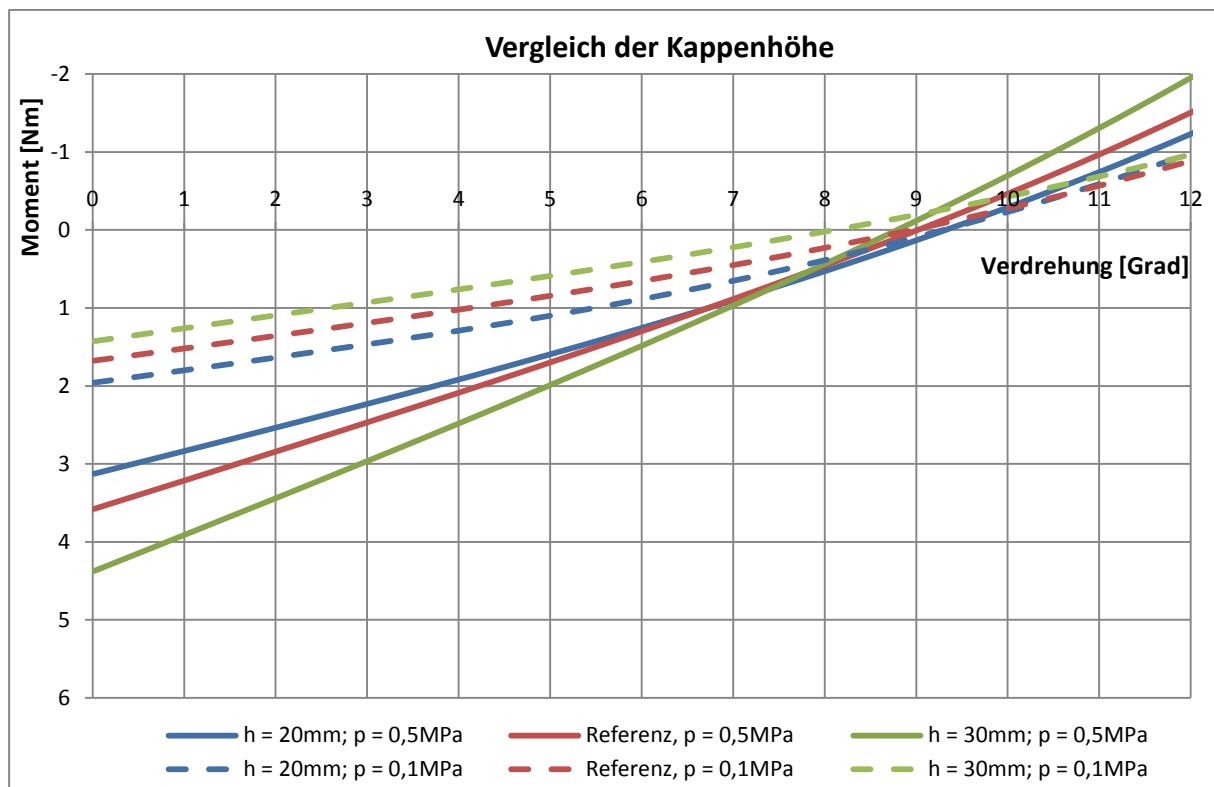


Abbildung 6.7: Momentkurven für Kappen mit 20 mm, 25 mm und 30 mm

6.4 Vergleich mit alternativen Konzepten

Abschließend ist ein Vergleich des DSEC-Konzeptes mit anderen Verschlussvarianten durchzuführen, um die Überlegenheit des Prinzips zu beweisen. Dazu wird die Referenzkappe von 25 mm mit einer ausschließlich nach der Kesselformel optimierten kuppelförmigen Kappe (Isotensoid-Kappe) sowie dem bereits erläuterten ebenen Verguss der Zelle verglichen. Erstere entsteht durch den in Abschnitt 4.2 dargestellten Prozess exklusive der Zellverformung, weshalb die quasi-isotensoidische Form innerhalb der Einbaukonfiguration der Zelle modelliert wird. Die Resultate beider Ansätze sind in Abbildung 6.8 vereinfacht dargestellt.

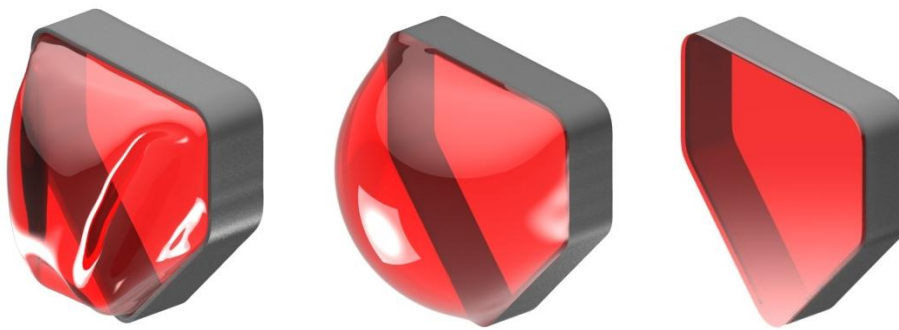


Abbildung 6.8: Geometrien der Konzepte DSEC, Isotensoid-Kappe und ebener Verguss (v.l.n.r)

Die Wandstärke- und Materialdefinition ist mit 1 mm respektive 50 MPa identisch zur Referenzkappe und gewährleistet ein Maximum an Vergleichbarkeit. Der Zyklus zum Test dieser unterschiedlichen Lösungen gestaltet sich analog zu Abschnitt 5.3. Ergebnisse des Versuches sind in Abbildung 6.9 dargestellt und bezeugen die deutlichen Vorteile der DSEC. So zeigt die Isotensoid-Kappe ohne die erarbeiteten Materialfaltungen zwar eine verformungsunterstützende Wirkung, welche auch mit zunehmendem Druck steigt aber nur einen limitierten Bereich der Zellbewegung umfasst. Da sich die Kappe bereits zu Simulationsbeginn in ihrer druckoptimalen Konfiguration befindet, wird sie bei tatsächlicher Bedruckung nur weiter gespannt. Eine Bewegung der Zelle entfernt die Kappe von ihrem Idealzustand und erfordert demzufolge früh Energie, wie am Nulldurchgang der jeweiligen Kurven zu erkennen ist. Ähnliches gilt für die dargestellt Vergussvariante, welche die Deformation der Zelle zu keiner Zeit begünstigt sondern ausschließlich behindert. Dieser Effekt wird mit steigendem Druck noch verschärft, weil eine Dehnung der zuvor ebenen Membran stattfindet. Die resultierenden Spannungen innerhalb des Vergusses wirken der Zellbewegung entgegen. Bei höheren Drucklasten kommt es außerdem

unweigerlich zum Auswölben dieser ursprünglich ebenen Lösung, wodurch ein möglicher Vorteil bezüglich Einbauhöhe vollständig zunichte gemacht wird. Dieses Effekt lässt sich zwar mit steigenden Wandstärke minimieren, ein derartiges Vorgehen verstärkt aber wiederum die aus den verformungsinduzierten Spannungen resultierenden und bewegungshemmenden Kräfte. Im Extremfall kommt es entlang der vertikalen Zellachse zu Verwerfungen des Vergussmaterials. Eine Zelldeformation wird auf diese Weise hochgradig blockiert. Die Darstellungen zeigen die DESC-Lösung als den anderen Konzepten klar überlegen.

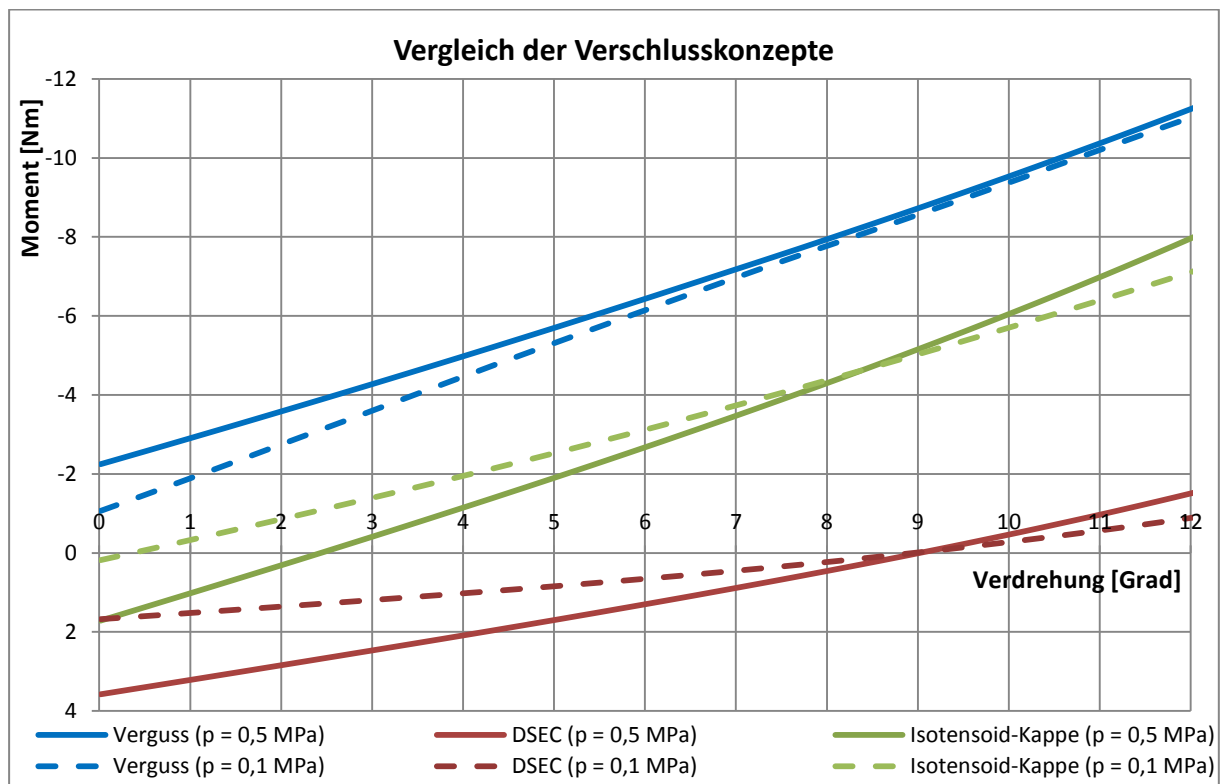


Abbildung 6.9: Momentkurven für die Konzepte DSEC, Isotensoid-Kappe und Verguss

6.5 Fazit

Die gemachten Untersuchungen zeigen zum einen die grundsätzliche Funktionalität des DSEC-Ansatzes und verifizieren somit das in der vorliegenden Arbeit dargestellte Konzept. Weiterhin findet eine klare Definition von optimaler Wandstärke sowie Elastizitätsmodul statt, welche eine gezielte Auswahl von Material und zu nutzendem Fertigungsprozess erlaubt. Die Ergebnisse belegen außerdem die Korrelation dieser beiden Parameter mit der Kappensteifigkeit und dem letztendlich erzielten Potenzial der Verformungsunterstützung. Auf die Tendenz der Oberfläche, sich maßgeblich durch Biegung zu verformen, hat allerdings nur die Wandstärke Auswirkung. Damit korrespondieren die Beobachtungen mit allen zuvor gemachten Annahmen. Abschließend zeigen Vergleiche von DSEC-Lösungen unterschiedlicher Sollhöhe, dass die theoretischen Überlegungen zur optimalen Kappenhöhe von 25 mm korrekt sind. Eine Gegenüberstellung mit einfacheren Verschlusskonzepten, namentlich dem Verguss der Zelle sowie einer Isotensoid-Kappe, bestätigt die DSEC als überragend. Nicht nur findet durch die erarbeiteten Kappen keine Behinderung der Zellbewegung statt, sondern vielmehr wird deren Verformung noch aktiv unterstützt.

Für die Fertigung eines Probekörpers wird passend zum gewählten Elastizitätsmodul von 50 MPa ein thermoplastischer Polyurethan Elastomer (TPU) der Firma BASF empfohlen. Diese Werkstoffe lassen während der Produktion durch Variation ihrer Bestandteile das gezielte Einstellen von Eigenschaften auf Kundenwünsche zu. Das Produkt Elastollan 1195 A bietet allerdings bereits in seiner Standardkonfiguration nahezu ideale Kennwerte (siehe Datenblatt in Anhang D; Seite XXVIII).

Die Verwendung dieses Werkstoffes erlaubt außerdem Fertigungsprozesse aus dem Bereich des Rapid Prototyping. Eine Verarbeitung durch selektives Lasersintern ist möglich und gewährt die exakte Abformung der Geometrie bei minimalen Werkzeugkosten.

Ein Einsatz der Kappe in die Zellstruktur ist mittels Klebeverbindung realisierbar. Potentielle Klebsysteme und nötige Maßnahmen zur Oberflächenbehandlung sind bereit in [11] erarbeitet.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist es gelungen, zu den vorhandenen formvariablen Zellstrukturen ein Bedruckungskonzept in Form von die Verformung unterstützenden Endkappen (DSEC) numerisch auszulegen und zu überprüfen. Innerhalb der Simulation konnte der ertragbare Arbeitsdruck erfolgreich auf den geforderten Wert von 1 MPa erhöht werden, wobei eine Unterstützung der Zellbewegung bis zu einer Flankenverdrehung von 9° gewährleistet wird.

Im Vergleich mit alternativen Konzepten bezüglich ihrer Eigenschaften und Ergebnisse der FE-Analysen, wird die Überlegenheit des DSEC-Ansatzes bestätigt und rechtfertigt dessen Favorisieren. Entgegen allen anderen Lösungen bietet er die Möglichkeit, die Zelldeformation zu fördern. Dies geschieht einzig aufgrund der erarbeiteten Kappengeometrie.

Die Ergebnisse der Simulation verifizieren außerdem gemachte Annahmen zu geometrischen Beziehungen sowie erwartetem Materialverhalten. Auf ihrer Basis finden mit Elastollan 1195 A und einer Wandstärke von 1 mm Empfehlungen bezüglich der möglichen Fertigung einer Probekappe statt.

Der erreichte Konvergenzzustand der Kappe mit 9° bietet allerdings noch Potenzial für weitere Untersuchungen, um eine Unterstützung der Zelle über größere Bereiche ihrer Bewegung zu realisieren. Auch ist es denkbar, dass eine Änderung der Material-Wandstärke-Kombination, sowohl im Zwischenschritt der Zellverformung, als auch in der endgültigen Kappe, zu stärkerem Falten der Oberfläche führt und größere Momente zur Verfügung stellt.

Um den Simulationsprozess benutzerfreundlicher zu gestalten ist außerdem der direkte Import von CAD-Daten sinnvoll. Dazu müssen die bestehenden Makro-Dateien überarbeitet werden, um fehlerfrei Flanken und Gelenke der Zelle selbstständig zu identifizieren.

7 Conclusions

Within the present work a pressurization concept in the form of deformation supportive end caps is developed for given morphing cellular structures. Design and testing is done in numerical simulations which successfully prove reliability of the caps when loaded with the demanded maximum pressure of 1 MPa while supporting the cell's movement of an angle up to 9° .

The comparison with alternative concepts concerning their properties and results in FE-Analysis shows the superiority of the DSEC approach and rectifies its choice. In contrast to all other solutions it offers the possibility to promote the cell deformation. This is done solely based on the developed cap geometry.

Furthermore the results of the simulation verify the assumptions made in terms of geometric relations as well as expected material behaviour. With Elastollan 1195 A and a wall thickness of 1 mm recommendations are given for the possible manufacturing of a prototype cap.

The convergence state reached at 9° shows potential for future examinations to improve the support of the cell over a wider range of its movement. It seems also possible that an alteration of the material-thickness-combination within the sub-step of cell transformation as well as for the final cap leads to stronger folding of the surface and higher momentum available.

To enhance user friendliness of the simulation process, direct import of CAD data is recommended. For that purpose the created macro files need to be adapted so that the accurate identification of cell walls and hinges is possible by the program itself.

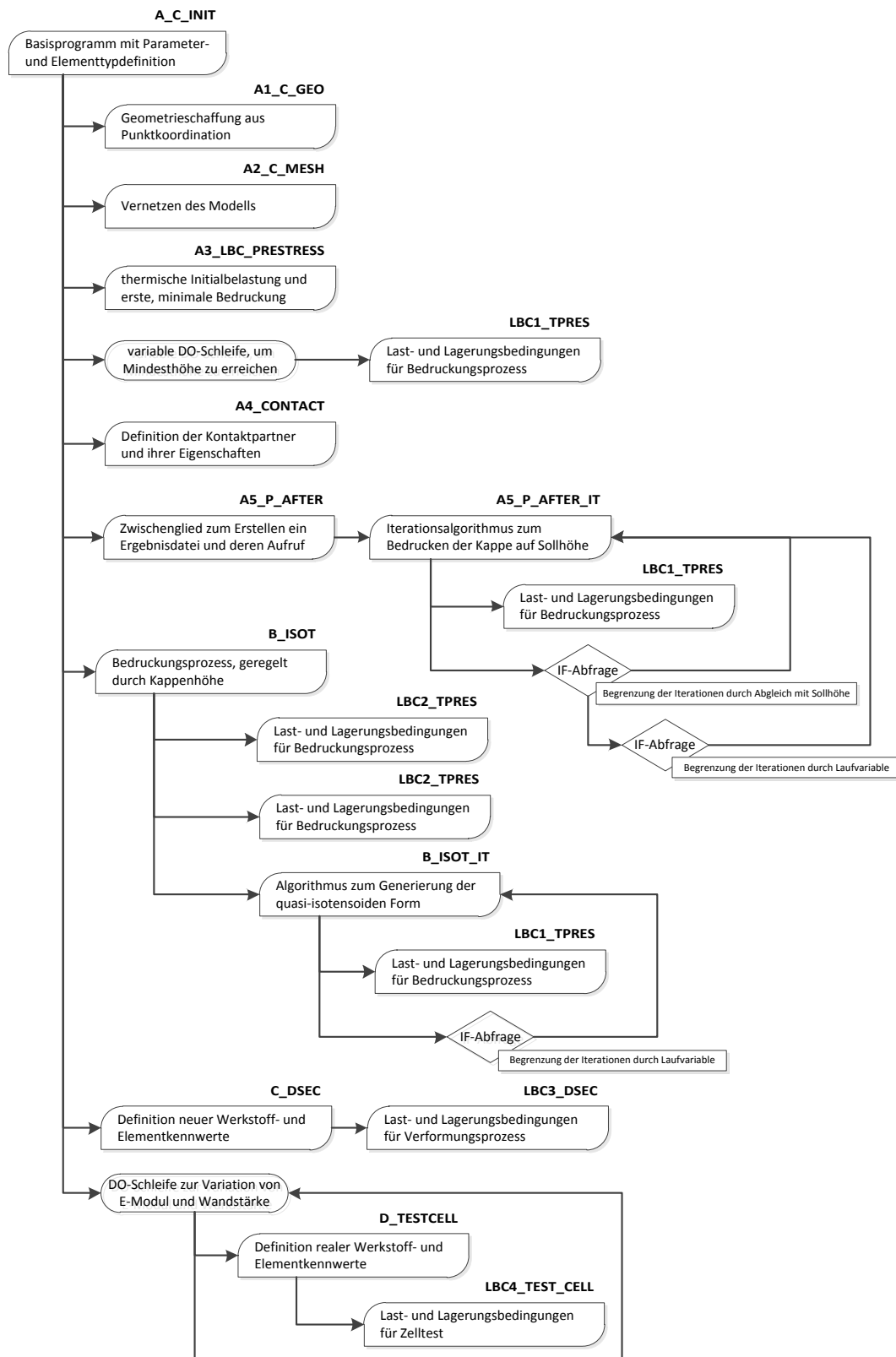
Literaturverzeichnis

- [1] Monner, H.P.; Kintscher, M.; Nagel, B.; Natterer, F.-J. und Krajenski, V.
"Morphing Wing" - Überblick und Trends
unbekannt, 2007
- [2] Pagitz; Lamacchia und Hol
Pressure-actuated cellular structures
Delft University of Technology; University of Rome 'La Sapienza', 2011
- [3] Gramüller, B.; Hühne, C.; und Boblenz, J.
PACS - Realization of an adaptive concept using pressure actuated cellular structures
German Aerospace Center (DLR), Braunschweig, 2014
- [4] Boblenz, J.
Konzipierung und Analyse von formvariablen Zellstrukturen in Faserverbundbauweise
Masterarbeit
Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, Leipzig, 2013
- [5] Bailey, R.
FEA non-linearity
PowerPoint presentation
University of the West of Scotland, School of Engineering, Paisley, 2013
- [6] ANSYS, Inc.
ANSYS Mechanical APDL Modeling and Meshing Guide, Release 13.0
ANSYS, Inc., Southpointe, 2010
- [7] ANSYS, Inc.
ANSYS Mechanical APDL Element Reference, Release 14.5
ANSYS, Inc., Southpointe, 2012

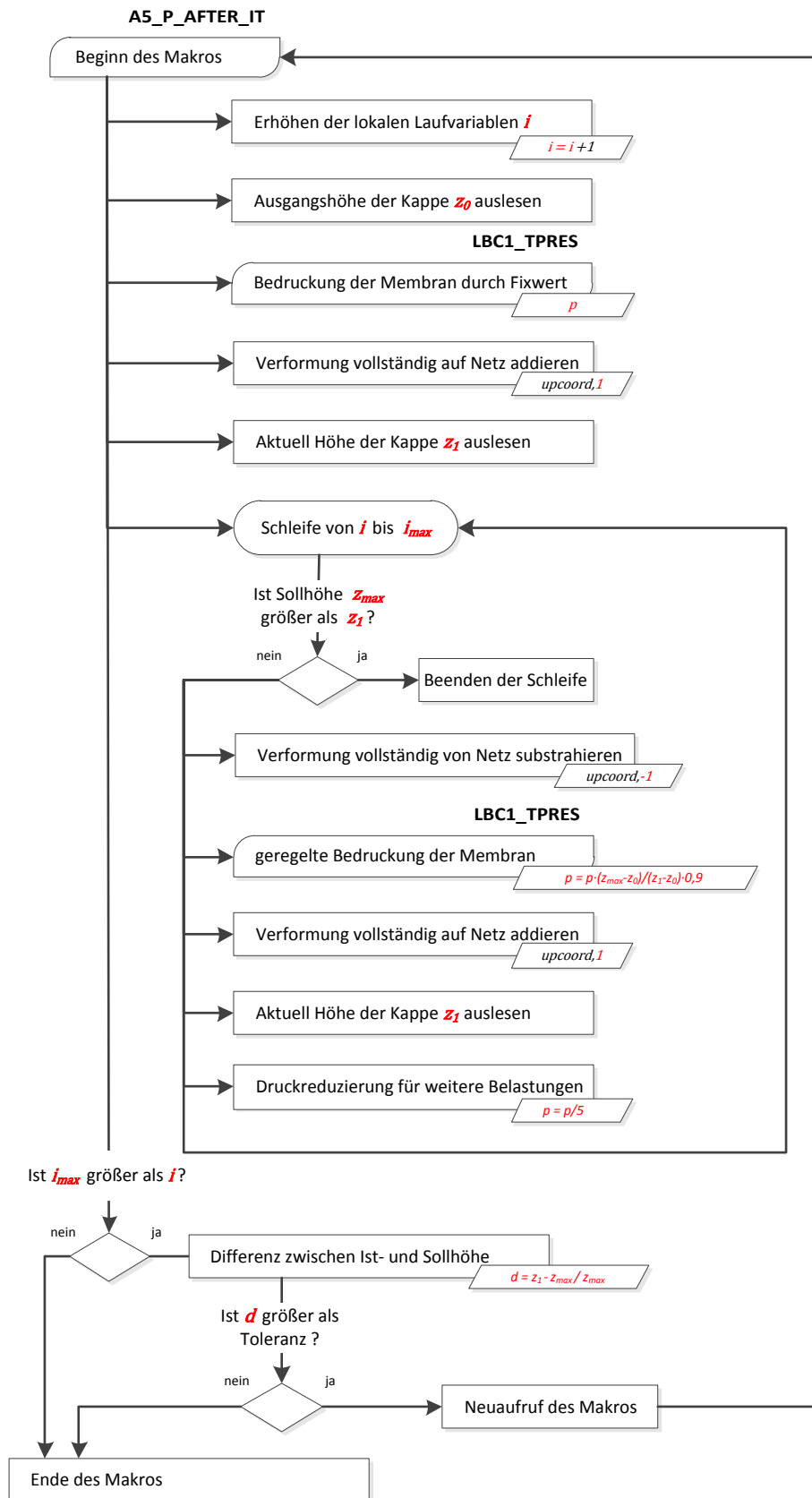
-
- [8] CADFEM – Service
Newsletter - Instabile Membran-Seil-Strukturen
CADFEM, 2006
- [9] ANSYS, Inc.
ANSYS Mechanical APDL Contact Technology Guide, Release 14.5
ANSYS, Inc., Southpointe, 2012
- [10] Bletzinger, K-U. and Ramm, E.
A General Finite Element Approach to the Form Finding of Tensile Structures by the Updated Reference Strategy
University of Karlsruhe, Karlsruhe, 1999
- [11] Tempel, A.
Recherche geeigneter Materialien zum Verschluss formvariabler Strukturen
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Braunschweig, 2014
- [12] BASF
Thermoplastische Polyurethan Elastomere (TPU) - Elastollan
BASF Polyurethane GmbH, Lehmförde, 2011
- [13] ANSYS, Inc.
FE Modeler, Release 12.1
ANSYS, Inc., Southpointe, 2009
- [14] ANSYS, Inc.
ANSYS Parametric Design Language Guide, Release 14.0
ANSYS, Inc., Southpointe, 2011
- [15] Kress, G.
Einführung in FEM-Programme
ETH Zürich, Zürich, 2012

Anhang

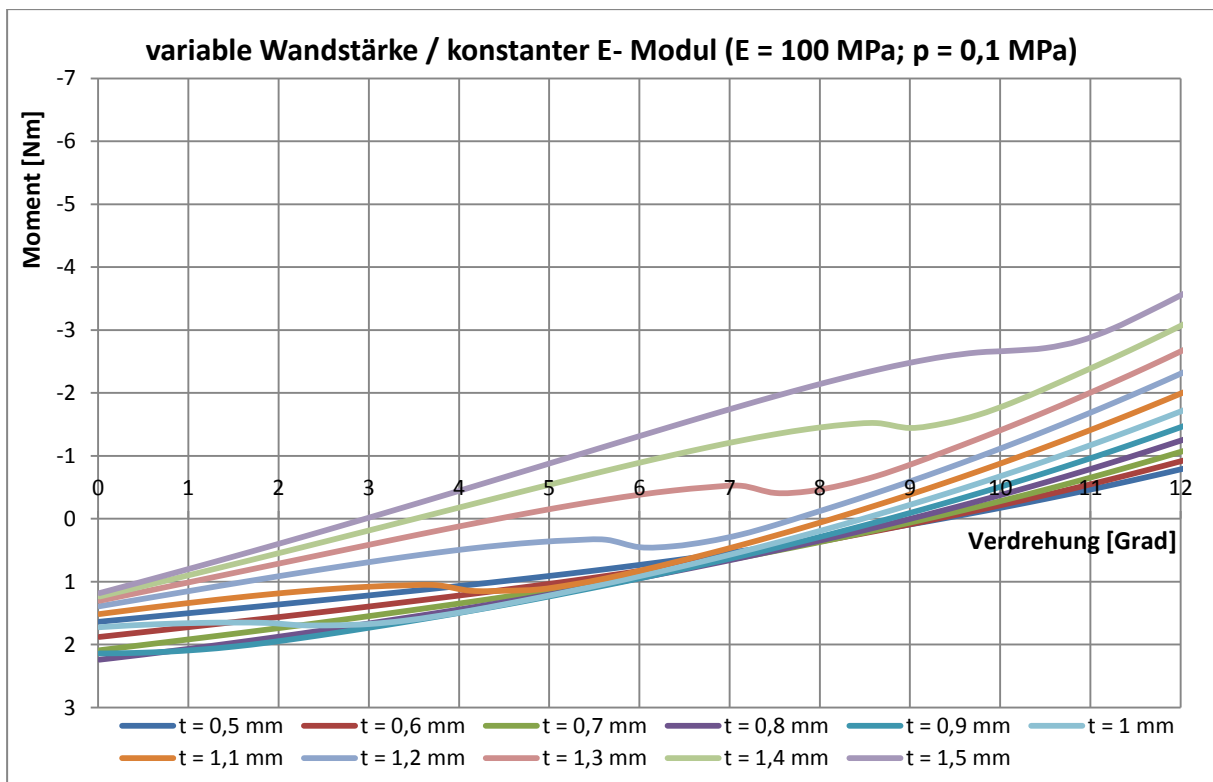
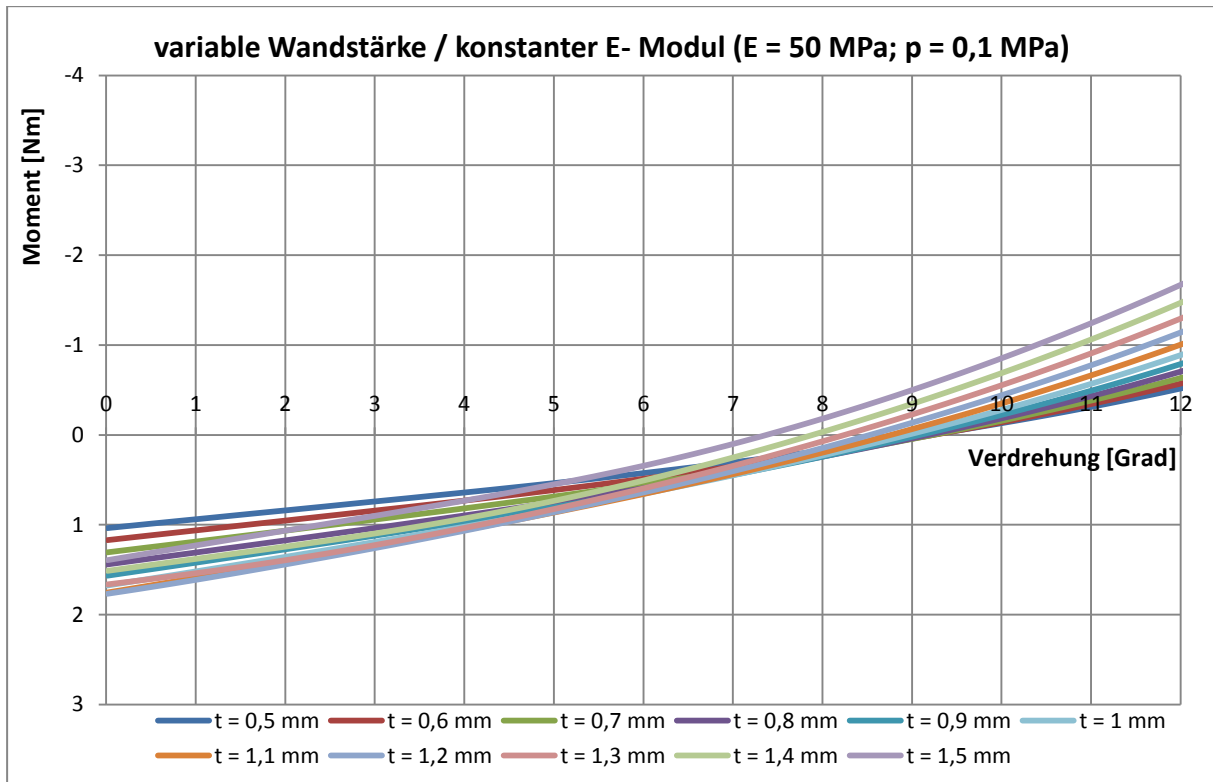
A1 – Schematischer Ablauf der Gesamtsimulation

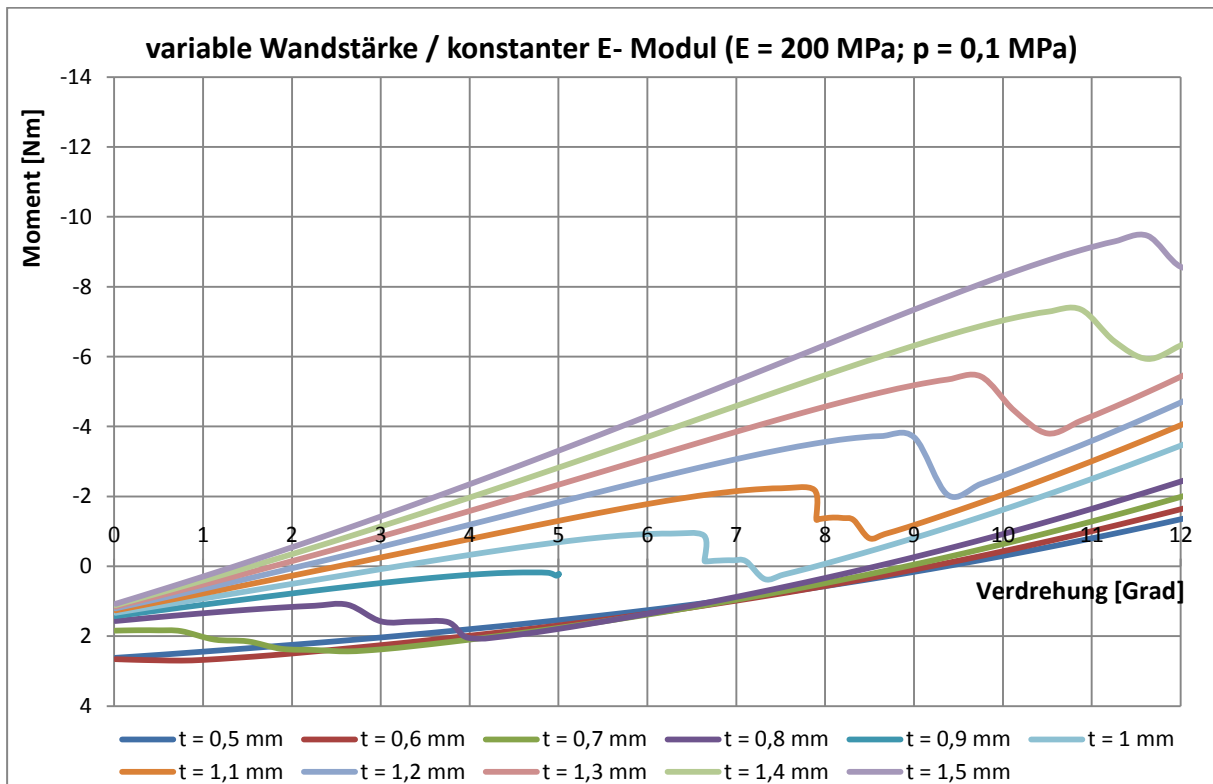
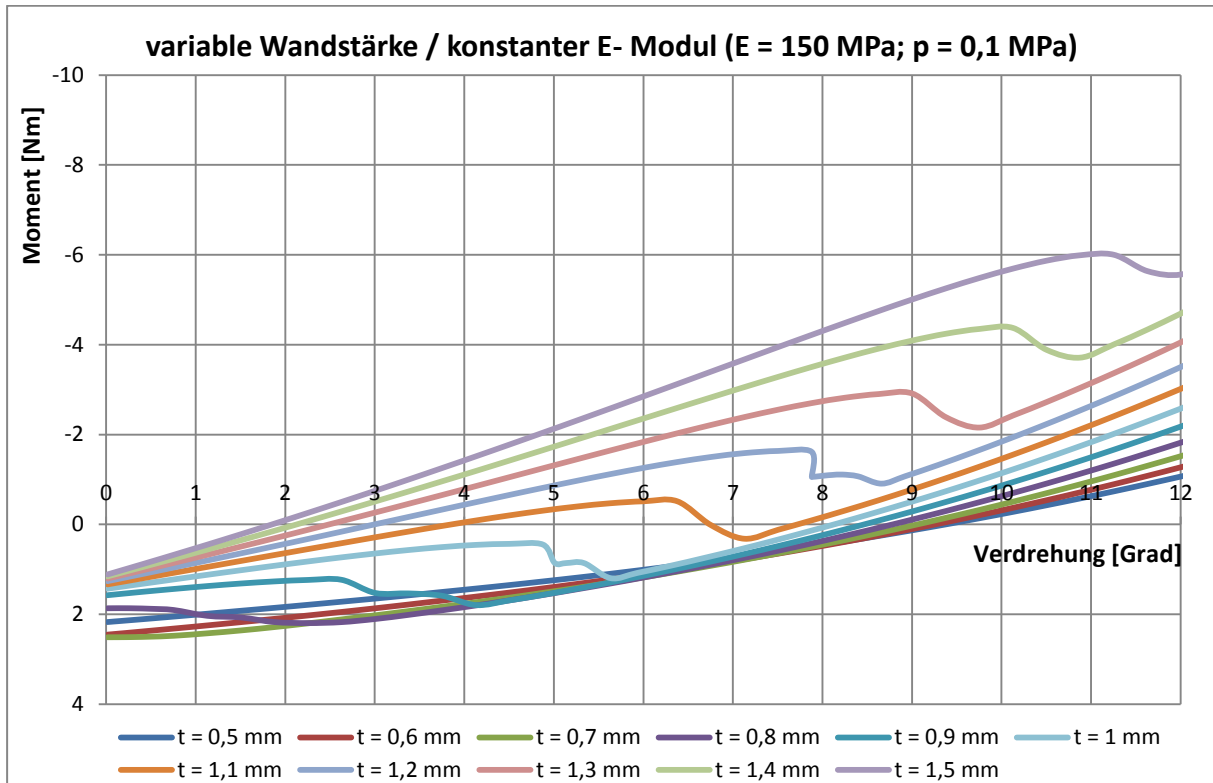


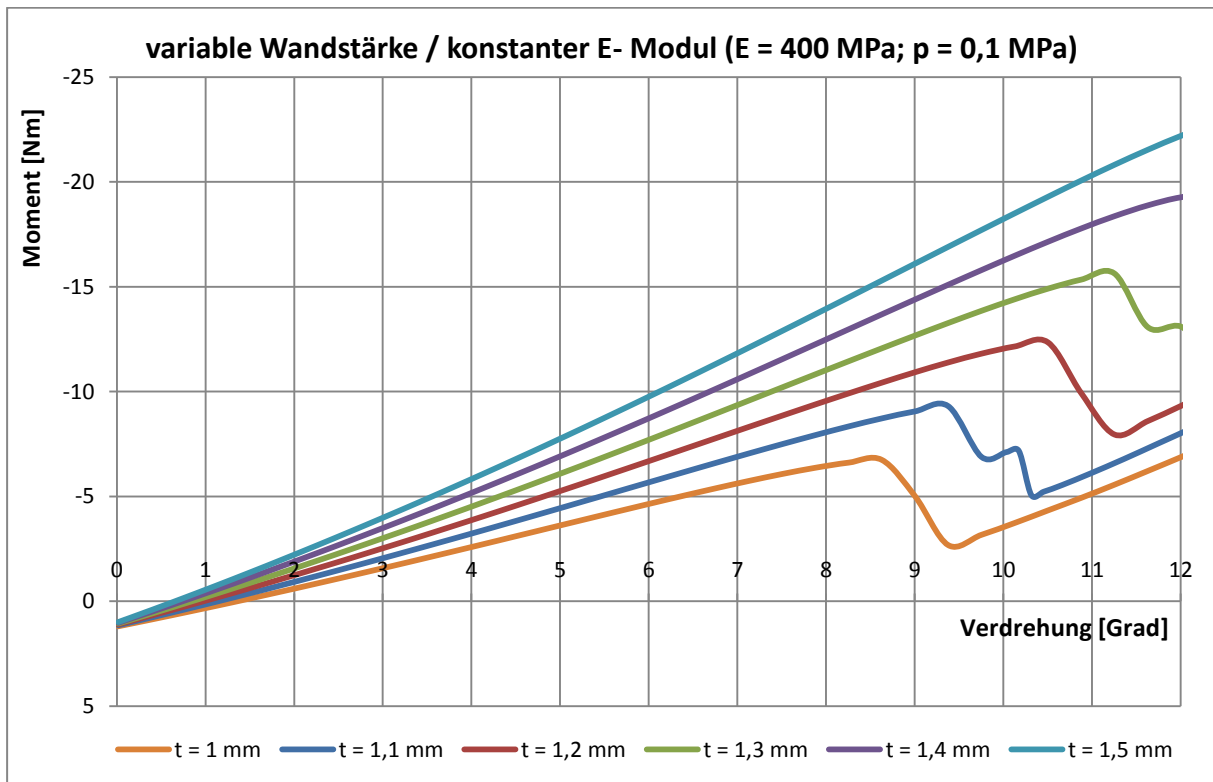
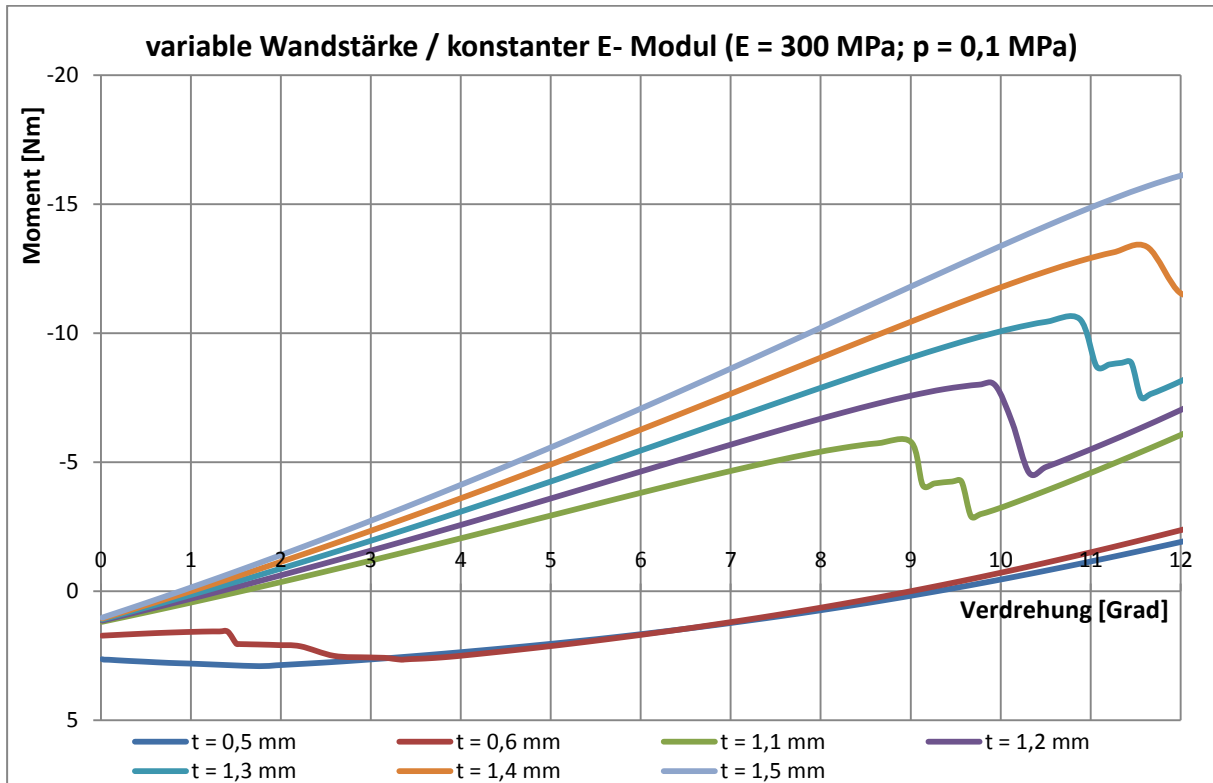
A2 – Schematischer Ablauf der Bedruckung

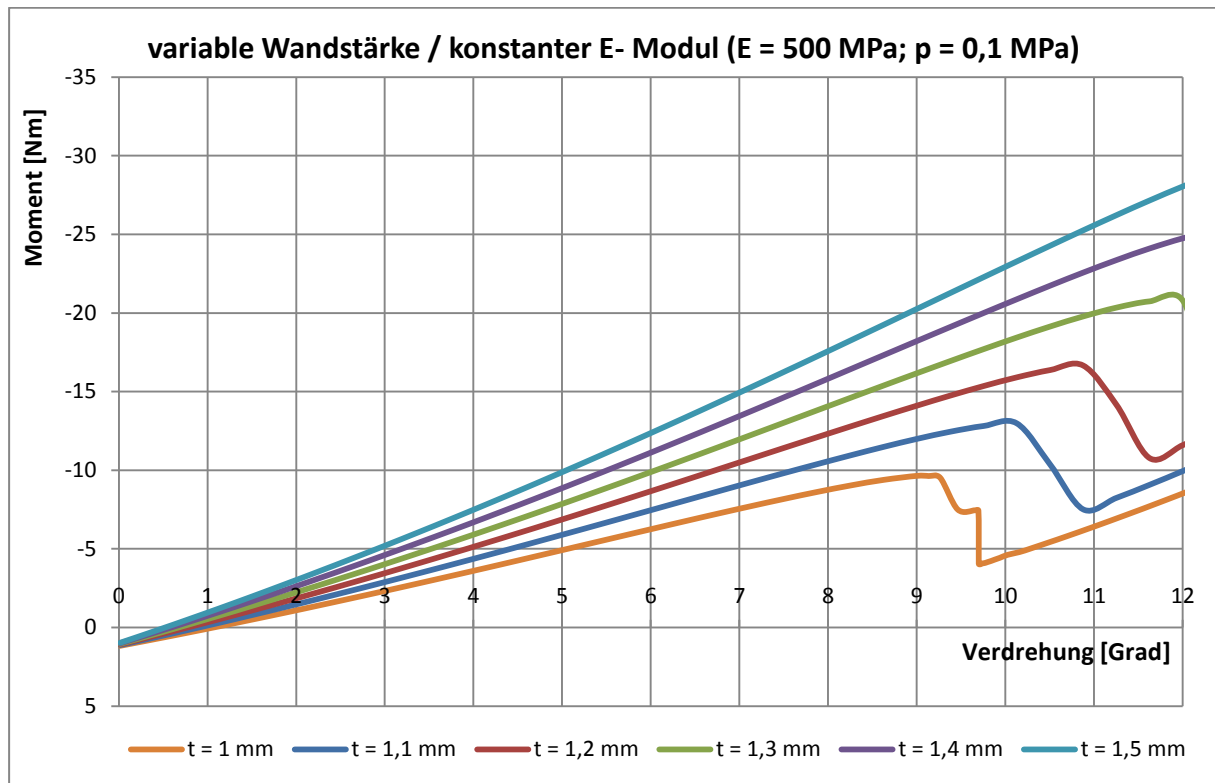


B1 – Ergebnisse Kappentest (Studie)

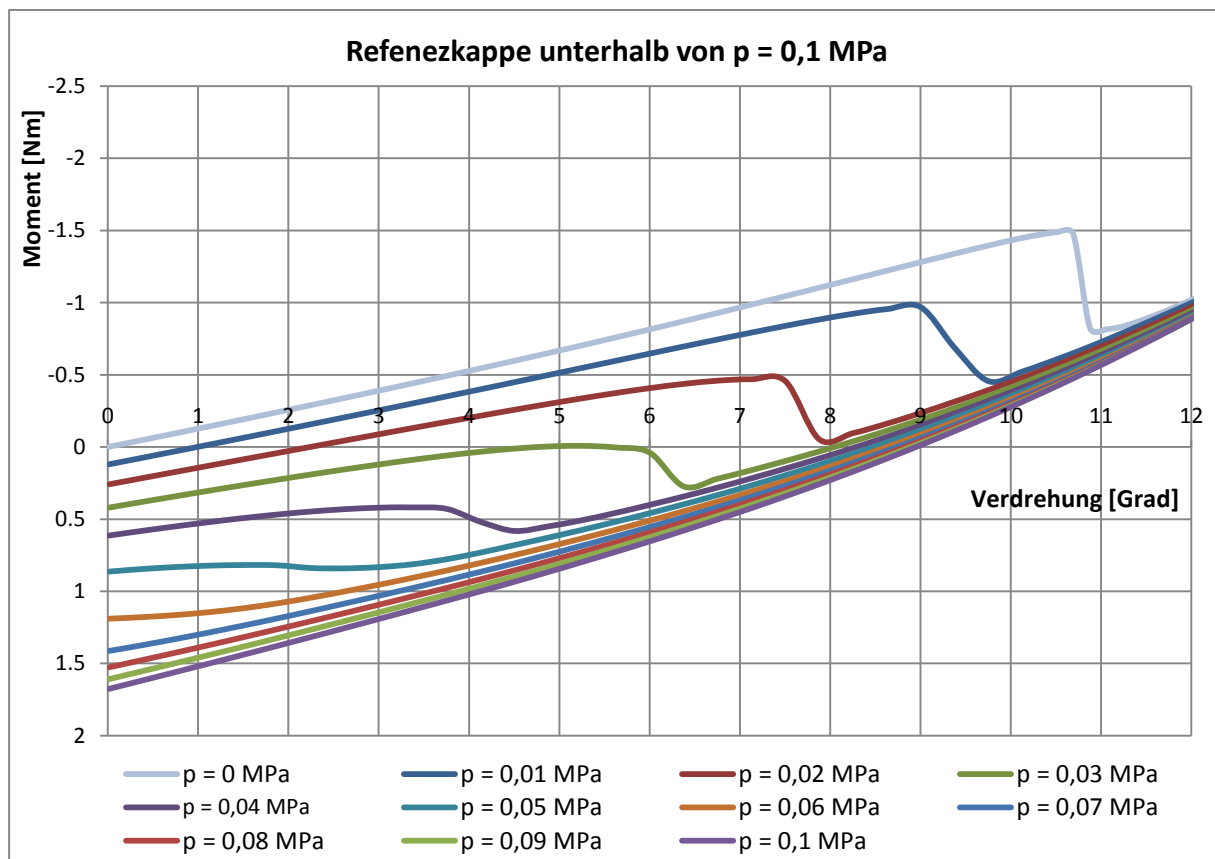








B2 – Ergebnisse Kappentest (Referenz unterhalb 0,1 MPa)



C1 – Quellcode (A_C_INIT.mac)

```

start
/title,cell sealing

!-----
! ----- PRE-PROCESSOR -----
!-----

/prep7

! ----- 1. basic variables -----

CellSize      =      50          ! general size of the cell
E_Seal        =      1e4         ! Young's modulus for first calculations
NU_Seal       =      0.3         ! Poisson Ratio for first calculations

thk_seal      =      0.1         ! sealing thickness (shell)
thk_seal_2    =      1          ! sealing thickness (shell)
thk_hinge     =      1          ! hinges thickness (shell)
thk_wall      =      10         ! cell wall thickness (shell)
thk_DSEC      =      1          ! Thickness Sealing for DSEC
l_Cell        =      250        ! Cell Length for Beams
rad_hinge     =      1          ! hinges radius (beam)
rad_wall      =      10         ! wall radius (beam)
offset        =      -0.1       ! contact offset of Cell to Membrane
radius        =      5          ! fillet radius

Esize1        =      1          ! element size sealing
Esize2        =      Esize1     ! element size cell

p_init        =      0.2        ! initial pressure
p_before      =      5          ! pressure before contact
p_after       =      5          ! pressure after contact
ls_before     =      4          ! load steps before contact
i_max_A5      =      10         ! Number of max Iterations

e_Isot        =      -0.16       ! Initial Prestress for Isotenoid
p_Isot        =      16          ! Initial Pressure for Isotenoid
i_max_B1      =      5          ! Number of Iteration for Isotenoid

Zmax          =      25          ! Zmax for Isotenoid
e_max         =      0.025       ! Max Epsilon for Initial Strain
f_Sigma       =      1          !
n_IT          =      15         !

PI            =      acos(-1)

! ---- 2. material properties -----

MPTEMP,1,0
mp, ex, 1, E_Seal          ! MAT SEALING
mp, ey, 1, E_Seal
mp, ez, 1, E_Seal
mp, prxy, 1, NU_Seal
mp, prxz, 1, NU_Seal
mp, pryz, 1, NU_Seal
mp, gxy, 1, 1
mp, gxz, 1, 1
mp, gyz, 1, 1
mp, alpx, 1, 1
mp, alpy, 1, 1
mp, alpz, 1, 0

```

```

mp, ex, 2, 2e7                                ! MAT BEAM
mp, prxy, 2, 0.33

mp, ex, 3, 1                                    ! MAT CELL
mp, ey, 3, 1
mp, ez, 3, 1
mp, gxy, 3, 0.5
mp, gxz, 3, 0.5
mp, gyz, 3, 0.5
mp, prxy, 3, 0
mp, prxz, 3, 0
mp, pryz, 3, 0

et, 1, beam188                                ! 3D 2-node beam, used as support for later cell deformation
et, 2, shell181, 0                             ! 4-node structural shell, used for outer cell construction
et, 3, shell181, 1                             ! used for cell sealing (allows later use of membrane option
=1)
et, 4, target170                               ! 3D target element for contact creation
et, 5, conta173                               ! 3D 4-node surface-to-surface contact element
et, 6, shell181, 1

sectype, 1, beam, RECT, beam_hinge            ! solid circular beam for hinges (support)
secdata, thk_hinge*50, 1, Cell,               ! setting beam radius

sectype, 2, beam, RECT, beam_wall             ! solid circular beam for walls (support)
secdata, thk_wall*50, 1, Cell,               ! setting beam radius

sectype, 3, shell, , shell_hinge              ! shell section for hinges (cell)
secdata, thk_hinge, 3, 0, 3                 ! setting shell thickness, material, theta, integration points

sectype, 4, shell, , shell_wall              ! shell section for walls (cell)
secdata, thk_wall, 3, 0, 3                 ! setting shell thickness, material, theta, integration points

sectype, 5, shell, , shell_seal              ! shell section for inner cell sealing
secdata, thk_seal, 1, 0, 3                 ! setting shell thickness, material, theta, integration points

! ---- 3. geometry creation -----
A1_C_GEO                                     ! call geometry macro

! ---- 4. meshing model -----
A2_C_MESH                                    ! call meshing macro

!-----
! ----- SOLVER -----
!-----

/solu
! set solver settings until LSCLEAR
antype, 0                                     ! Static analysis
nlgeom, on                                   ! Non-linear geometry on
autots, on                                   ! auto time stepping
nsubst, 100, 100000, 20                     ! Size of first substep=0.1
outres, all, all                             ! save results of all iterations

```

```
! ---- 5. create LBCs -----
!-----

! ---- 5.1 thermal pre-stress ---

A3_LBC_PRESTRESS

! --- 5.3 pressurizing before contact ---

*do,i,1,ls_before
    LBC1_TPRES,0,p_before      ! call pressurizing macro
    finish
    /prep7
    upcoord,1,on              ! clear deformation
    finish
    /solu
*enddo

! --- 5.4 setting contact ---

A4_CONTACT                    ! call contact macro

! --- 5.5 pressurizing after contact ---

A5_P_AFTER                    ! call pressurizing macro
SAVE

! --- 6. ISOTENSOID ---

B_ISOT                        ! call isotensoid macro
SAVE

! --- 7. create Deformation Supportive End Cap ---

/prep7
upcoord,1,on                  ! clear deformation
C_DSEC                        ! call cap deformation macro
SAVE

! --- 8. Test Cap ---

/prep7
upcoord,1,on                  ! clear deformation
*do,i_E,1,10                  ! loop for Young's modulus variation
    *do,i_t,1,10              ! loop for thickness variation
        D_testcell            ! call testing macro
    *enddo
*enddo

/eof                          ! end of file
```


C2 – Quellcode (A1_C_GEO.mac)

```

! ---- geometry macro -----
finish
/prep7
!-----
! ---- arguments: none -----

! ---- 3.1 keypoint positioning -----

num_hinges = 5                                ! number of hinges depending on cell geometry
*dim,a_PosKP,array,num_hinges,2              ! array with pre-defined keypoint locations
a_PosKP(1,1) = 0.41269, -3.8568, 25, 53.8568, 49.58731
a_PosKP(1,2) = -0.28229, -24.4961, -46.8903, -24.4961, -0.28229

*do, i,1,num_hinges                          ! put keypoint on array locations
  k,i,a_PosKP(i,1),a_PosKP(i,2)              ! 1st set of keypoints for membrane
  k,num_hinges+i,a_PosKP(i,1),a_PosKP(i,2),offset ! 2nd set of keypoints for cell
*enddo

*get,x_pos,kp,num_hinges+1,loc,x              ! get location of 1st keypoint in 2nd set
*get,y_pos,kp,num_hinges+1,loc,y

k,1000,x_pos,y_pos,0.5*Zmax                   ! define keypoint for extrusion line

! ---- 3.2 line creation -----

*do, i,1,num_hinges                          ! create 1st set of lines for membrane
  l,i,mod(i,num_hinges)+1
*enddo

*do, i,1,num_hinges                          ! create 2nd set of lines for cell
  l,i+num_hinges,mod(i,num_hinges)+1+num_hinges
*enddo

*do, i,1,num_hinges                          ! create 1st set of lines for membrane
  lfillt,i,mod(i,num_hinges)+1, radius
*enddo

*do, i,1,num_hinges                          ! create 1st set of lines for membrane
  lfillt,i+num_hinges,mod(i,num_hinges)+1+num_hinges, radius
*enddo

l,num_hinges+1,1000                          ! create extrusion line
*get,extrusion,line,0,num,maxd

! ---- 3.3 area creation -----

lsel,s,loc,z,0                                ! select lines of 1st set via location
al,all                                         ! create 1st area from selected lines
lsel,all

lsel,s,loc,z,offset                          ! select lines of 2nd set via location
adrag,all,,,,,extrusion                     ! drag all selected lines along extrusion line
asel,all

asel,u,area,,1                               ! unselect membrane area
aglu,all                                     ! glue all selected areas
allsel,all

/eof                                          ! end of file

```

C3 – Quellcode (A2_C_MESH.mac)

```

! ---- meshing macro -----
finish
/prep7
!-----
! ---- arguments: none ----

! ---- 4.1 meshing model -----

esize, Esize2                                ! set element size for whole outer cell
mat, 2                                         ! stiff material for cell and beam construction
type, 1                                       ! select beam
secnum, 1                                     ! section of beam hinges
lmesh, num_hinges*3+1, num_hinges*4          ! mesh beam hinges (line 16 to 20)

secnum, 2                                     ! section of beam walls
lmesh, num_hinges+1, num_hinges*2            ! mesh beam walls (line 6 to 10)

type, 2                                       ! select shell
secnum, 3                                    ! section of cell hinges
mshape, 0, 2D                                ! quad elements
amesh, 3, num_hinges*2+1, 2                  ! mesh cell hinges (area 3 to 11, increment of 2)

secnum, 4                                    ! section of cell walls
amesh, 2, num_hinges*2, 2                     ! mesh cell walls (area 2 to 10, increment of 2)

esize, Esize1                                ! set element size for cell sealing
mat, 1                                         ! hyperelastic material (with option to use MISO)
secnum, 5                                     ! section of cell sealing
type, 3                                       ! select shell (with option to use membrane)
mshape, 1, 2D                                ! triangular element shape
amesh, 1                                       ! only meshing area 1

allsel, all

! define named selection for boundaries
lsl, s, loc, z, 0                             ! select 1st set of lines via location
nsl, s, 1                                     ! select nodes from lines
cm, fixnodes_sealing, nodes                    ! define named selection
allsel, all

esel, s, type, , 2                             ! select elements of outer cell
nsle, s, all                                   ! select nodes from elements
cm, fixnodes_cell, nodes                       ! define named selection

/eof                                           ! end of file

```

C4 – Quellcode (A3_LBC_PRESTRESS.mac)

```
! ---- pre-stress macro -----
finish
/prep7
!-----
! ---- arguments: none ----

! ---- 5.1 thermal pre-stress ---

        finish
        /solu
cysel,s,fixnodes_sealing      ! select nodes
D,all,,0,, , ,UX,UY,UZ, , ,  ! constrain selected nodes
allsel,all

cysel,s,fixnodes_cell        ! select nodes
D,all,all                    ! fix selected nodes completely
allsel,all

esel,s,type,,3               ! select sealing elements
nsle,s,,all                  ! select nodes from elements
tref,0                        ! setting reference temperature
bf,all,temp,-0.001           ! applying new temperature
allsel,all

solve

! --- 5.2 initial pressure ---

esel,s,type,,3               ! select sealing elements
sfe,all,1,pres,,p_init       ! pressurize all selected elements
allsel,all
solve

        finish
        /prep7
        upcoord,1,on          ! clear deformation
        finish
        /solu

/eof                          ! end of file
```

C5 – Quellcode (LBC1_TPRES.mac)

```
! ---- pressurizing macro ----
!-----
! ---- arguments: Initial Temperature, Pressure ----

finish
/solu
    lsclear,fe                ! clear finite element loads
    cmsel,s,fixnodes_sealing ! select nodes
    D,all,,0,,UX,UY,UZ,,    ! constrain selected nodes
    allsel,all

    cmsel,s,fixnodes_cell    ! select nodes
    D,all,all                ! fix selected nodes completely
    allsel,all

    esel,s,type,,3          ! select sealing elements
    ! Internal Stress
    tref,0                  ! setting reference temperature
    bf,all,temp,arg1        ! applying new temperature
    sfe,all,1,pres,,arg2    ! pressurize all selected elements
    allsel,all
    solve

/eof                          ! end of file
```

C6 – Quellcode (A4_CONTACT.mac)

```
! ---- contact macro -----
finish
/prep7
!-----
! ---- arguments: none ----

! setting key-options for contact behaviour
    keyopt, 5, 1, 0          ! select DOF (ux,uy,uz)
    keyopt, 5, 9, 0          ! include initial penetration
    keyopt, 5, 10, 2         ! update each load step
    keyopt, 5, 11, 0         ! exclude shell thickness
    keyopt, 5, 12, 2         ! no separation of contacting surfaces (sliding permitted)

r, 3                        ! create shared real constant set
real, 3

mp,mu,1,                    ! set friction coefficient to zero
mp,mu,2,                    ! also for material 2
mat,2                       ! stiff material of shell and beam construction
type,4                      ! select target element type
secnum,5                    ! section of cell sealing
esel,s,type,,2              ! select outer cell elements
nsle,s,all                  ! select nodes from elements
esurf,,bottom               ! create new surface from nodes with opposite orientation

mat,1                       ! hyperelastic material (with option to use MISO)
type,5                      ! select contact element type
secnum,5                    ! section of cell sealing
esel,s,type,,3              ! select cell sealing elements
nsle,s,all                  ! select nodes from elements
esurf,,top                  ! create new surface from nodes with same orientation

allsel,all

/eof                          ! end of file
```

C7 – Quellcode (A5_P_AFTER_IT.mac)

```

! --- 5.5 pressurizing after contact - ITERATION ---

! ---- Basic Variables ----
i_A5      = i_A5+1                                ! set iteration counter

! ---- Iterate ----

      esel,s,type,,3                                ! select elements
      nsle,s,all                                    ! select nodes from elements
      *get,Z0,NODE,0,mxloc,z                        ! get cap height
      allsel,all

LBC1_TPRES,0,p_after                                ! call pressurizing macro
      finish
      /prep7
      upcoord,1                                     ! clear deformation
      esel,s,type,,3                                ! select elements
      nsle,s,all                                    ! select nodes from elements
      *get,Z1,node,0,mxloc,z                        ! get cap height
      allsel,all

*DO,i_A5,i_A5,i_max_A5
      *IF,Zmax,GT,Z1,then
          *EXIT                                     ! exit loop
      *ENDIF
      finish
      /prep7
      upcoord,-1                                     ! clear deformation
      p_after = p_after*(Zmax-Z0)/(Z1-Z0)*0.9      ! pressure adjustment

      LBC1_TPRES,0,p_after                            ! call pressurizing macro
          finish
          /prep7
          upcoord,1                                    ! clear deformation
          finish
          /prep7
          esel,s,type,,3                                ! select elements
          nsle,s,all                                    ! select nodes from elements
          *get,Z1,node,0,mxloc,z                        ! get cap height
          allsel,all
      p_after = p_after/5                            ! pressure adjustment
*ENDDO

X_SHOW_STRESSES                                    ! save certain values to file
*GET,Smax,PLNSOL,0,MAX
*GET,Smin,PLNSOL,0,MIN
*CREATE,ansuitmp
*CFOPEN,D:\Endkappe\AT_V2.0\IT_Iso,txt,,APPEND
*VWRITE,' ',i_A5,' ',Z1,' ',p_after,' ',Smax,' ',Smin,' ',Smax/Smin
(A6,F10.5, A6,F10.5, A6,F10.5, A6,F10.5, A6,F10.5, A6,F10.5)
*CFCLOSE
*END
/INPUT,ansuitmp

! ---- LOOP ----

*IF,i_max_A5,GT,i_A5,then
      dZ = abs((Z1-Zmax)/Zmax)
      *IF,dZ,GT,0.01,then
          A5_P_AFTER_IT                                ! restart macro
      *ENDIF
*ENDIF

/eof                                                ! end of file

```

C8.1 – Quellcode (B_ISOT.mac)

```

! ---- ISOTENSOID macro ----
!-----
! ---- arguments: none ----

i_B1          = i_A5+1          ! set iteration counter
i_max_B1      = i_max_B1+i_A5   ! set iteration limit

p_ISOT = -4*e_ISOT*thk_seal*E_Seal/CellSize*(1+NU_Seal)

        finish
        /solu
LBC2_TPRES,e_ISOT,p_ISOT*(1-0.2)      ! call pressurizing macro
LBC2_TPRES,e_ISOT,p_ISOT*(1+0.2)      ! call pressurizing macro
        finish
        /post1
set,last
*GET,i_SSNum,ACTIVE,0,SET,SBST         ! get number of substeps
SubStep = i_SSNum+1

*DO,i_IT,1,i_SSNum
    finish
    /post1
    SubStep = SubStep-1
    SET,2,SubStep,1
        finish
        /prep7
        upcoord,1                    ! clear deformation
    esel,s,type,,3                    ! select elements
    nsle,s,all                        ! select nodes from elements
    *get,Z0,node,0,mxloc,z            ! get cap height
    allsel,all
        upcoord,-1                    ! reset deformation

    *IF,0,GT,Z0-Zmax,then
        finish
        /post1
        *GET,T0,ACTIVE,0,SET,TIME     ! get current loading
        SET,2,SubStep+1,1
        *GET,T1,ACTIVE,0,SET,TIME     ! get previous loading
        finish
        /prep7
        upcoord,1                    ! clear deformation
    esel,s,type,,3                    ! select elements
    nsle,s,all                        ! select nodes from elements
    *get,Z1,node,0,mxloc,z            ! get cap height
    allsel,all
        upcoord,-1                    ! reset deformation

    *EXIT                             ! exit loop
*ENDIF
*ENDDO

p_Factor = T0-1+(Zmax-Z0)*(T1-T0)/(Z1-Z0)
upcoord,p_Factor/(T1-1)
p_ISOT = p_ISOT*0.8+p_ISOT*0.4*p_Factor

Z1      = Zmax
dZ2     = 0
p2      = p_Isot*1.05

B_ISOT_IT          ! call isotensoid iteration macro

/eof                ! end of file

```

C8.2 – Quellcode (B_ISOT_IT.mac)

```

! ---- ISOTENSOID iteration macro ----
!-----
! ---- arguments: none ----

i_B1 = i_B1+1                                ! set iteration counter

LBC1_TPRES,e_ISOT,p_ISOT                    ! call pressurizing macro
Z0      = Z1
dZ1     = dZ2
p1      = p2

finish
/prep7
upcoord,1,on                                ! clear deformation
      esel,s,type,,3                        ! select elements
      nsle,s,all                            ! select nodes from elements
      *get,Z1,node,0,mxloc,z               ! get cap height
      allsel,all

dZ2     = Z1-Z0                             ! compute difference
p2      = p_Isot                            ! update pressure

p_Isot = (Zmax-Z1-dZ1)*(p2-p1)/(dZ2-dZ1)+p1 ! adjust pressure

! ---- LOOP ----

i_count = i_count-1
*IF,i_max_B1,GT,i_B1,then
      B_ISOT_IT                            ! restart macro
*ENDIF

/eof                                         ! end of file

```

C9 – Quellcode (C_DSEC.mac)

```
! ---- deformation macro ----
!-----
! ---- arguments: none -----

! -- setting new material properties --
!-----

FINISH
/prep7
E_Factor=      1e9
mp, ex, 1, 1*E_Factor      ! setting material for cell deformation
mp, ey, 1, 1*E_Factor
mp, ez, 1, 1*E_Factor
mp, gxy, 1, 0.385*E_Factor
mp, gxz, 1, 0.385*E_Factor
mp, gyz, 1, 0.385*E_Factor
mp, prxy, 1, 0
mp, prxz, 1, 0
mp, pryz, 1, 0

!mp, ex, 2, 2e9      ! MAT BEAM
!mp, prxy, 2, 0.33

sectype, 6, shell, , shell_def      ! shell section for inner cell sealing
secdata, 0.25, 1, 0, 3      ! setting shell thickness, material, theta, integration points
keyopt,3,1,0      ! Switch off MEMBRANE Opt (-> =0)

      esel,s,type,,3      ! select elements of material (MISO)
      emodif,all,mat,1      ! change selected elements to material 1
      emodif,all,sec,6      ! change selected elements to section 6
      allsel,all

! -- create LBCs --
!-----

LBC3_DSEC      ! call boundary condition macro

      finish
      /prep7

X_SHOW_STRESSES

/eof      ! end of file
```


C10 – Quellcode (LBC3_DSEC.mac)

```

! ---- deformation condition macro ----
!-----
! ---- arguments: none ----

finish
/solu

nsubst,100,100000,20                                !Size of first substep=0.1

lsclear,fe                                           ! clear finite element loads
CPDELE,All                                           ! Delete all Couplings

      cmsel,s,fixnodes_cell
      nsel,r,loc,z,offset
      *get,num_nodes,node,0,count                    ! select nodes on location (BEAM/CELL-Bottom - Nodes)
                                                    ! count selected nodes

      *GET,i_NNum,NODE,0,NUM,MIN
      *do,i,1,num_nodes
          *get,x_pos,NODE,i_NNum,loc,x                ! get the x- and y-position
          *get,y_pos,NODE,i_NNum,loc,y                ! of each node listed in array
          cmsel,s,fixnodes_cell                       ! SELECT BEAM and CELL Nodes
          cmsel,a,fixnodes_sealing                    ! Nodes Bottom of SEALING
          nsel,r,loc,x,x_pos                           ! and select all nodes located
          nsel,r,loc,y,y_pos                           ! above these nodes
          cp,next,ux,all                               ! create coupled sets for selected nodes
          cp,next,uy,all
          cp,next,rotz,all

          cmsel,s,fixnodes_cell
          nsel,r,loc,z,offset                          ! select nodes on location (BEAM/CELL-Bottom - Nodes)

          *GET,i_NNum,NODE,i_NNum,NXTH
      *enddo

      cmsel,s,fixnodes_cell                           ! Nodes BEAM and CELL-Bottom
      cmsel,a,fixnodes_sealing                       ! Nodes Bottom of SEALING
      D,all,uz                                         ! constrain nodes
      D,all,ROTX
      D,all,ROTY

      lsel,s,line,,num_hinges*2                      ! Line 1 (upper left) from BEAM/CELL-Bottom
      nsll,s,0                                         ! select nodes from lines
      D,all,all                                         ! fix selected nodes

      lsel,s,line,,num_hinges+1                      ! Line 2 (upper left) from BEAM/CELL-Bottom
      nsll,s,0                                         ! select nodes from lines
      D,all,rotz,0.175                                 ! node rotation Equal 10deg
      allsel,all
      lsel,s,line,,num_hinges+4                      ! Line 5 (upper left) from BEAM/CELL-Bottom
      nsll,s,0                                         ! select nodes from lines
      D,all,rotz,-0.175                               ! node rotation Equal -10deg
      allsel,all

      lsel,s,line,,num_hinges+2                      ! Line 2 (upper left) from BEAM/CELL-Bottom
      nsll,s,0                                         ! select nodes from lines
      D,all,rotz,-0.1724                              ! node rotation Equal 10deg
      allsel,all
      lsel,s,line,,num_hinges+3                      ! Line 5 (upper left) from BEAM/CELL-Bottom
      nsll,s,0                                         ! select nodes from lines
      D,all,rotz,0.1724                               ! node rotation Equal -10deg
      allsel,all

      solve

      /eof                                           ! end of file

```

C11 – Quellcode (D_TESTCELL.mac)

```

! ---- TEST CELL Macro ----
!-----
! ---- arguments: none -----

! -- setting new material properties --
! 1.) Material 1, "Sealing", to Real End Cap Material and Wall Thickness
! 2.) Material 2, "BEAM" to Real Cell Material and Geometry
!-----

keyopt, 5, 12, 0                                ! normal contact (sliding and separation permitted)

finish
/prep7

thk_testcell = i_t/10

E_modul = 50*i_E

mp, ex, 1, E_modul                                ! material cap
mp, ey, 1, E_modul
mp, ez, 1, E_modul
mp, gxy, 1, 0.375*E_modul
mp, gxz, 1, 0.375*E_modul
mp, gyz, 1, 0.375*E_modul
mp, prxy, 1, 0.33
mp, prxz, 1, 0.33
mp, pryz, 1, 0.33

sectype, 7, shell, , shell_def
secdata, thk_testcell, 1, 0, 3
    esel,s,type,,3                                ! select elements of material (MISO)
    emodif,all,sec,7
    emodif,all,mat,1                                ! change selected elements to material 1
    allsel,all

mp, ex, 2, 1.5e3                                    ! MAT BEAM - PA12
mp, prxy, 2, 0.43

sectype, 8, beam, RECT, beam_hinge
secdata,thk_hinge,l_Cell,
    esel,s,SEC,,1                                ! select elements of material (MISO)
    emodif,all,sec,8
    emodif,all,mat,2                                ! change selected elements to material 1
    allsel,all

sectype, 9, beam, RECT, beam_wall
secdata,thk_wall,l_Cell,
    esel,s,SEC,,2                                ! select elements of material (MISO)
    emodif,all,sec,9
    emodif,all,mat,2                                ! change selected elements to material 1
    allsel,all

!-----

*do,i_sol,0,10                                    ! loop for pressure variation
    p_def = i_sol*0.1
    LBC4_TEST_Cell                                ! call boundary condition macro
    get_moment,strcat(str1,chrval(p_def))          ! call post macro
*enddo

/eof                                                ! end of file

```

C12 – Quellcode (LBC4_TESTCELL.mac)

```

! ---- DSEC TEST condition Macro ----
!-----
! ---- arguments: none -----

!-----

finish
/solu

nsubst,1000,100000,40                                !Size of first substep=0.01

! ---- 1.) BOUNDARY Conditions ----

lsclear,fe                                             ! clear finite element loads
CPDELE,All                                             ! Delete all Couplings

      cmsel,s,fixnodes_cell
      nsel,r,loc,z,offset                             ! select nodes on location (BEAM/CELL-Bottom - Nodes)
      *get,num_nodes,node,0,count                     ! count selected nodes

      *GET,i_NNum,NODE,0,NUM,MIN                       ! get minimum node number
      *do,i,1,num_nodes
          *get,x_pos,NODE,i_NNum,loc,x                 ! get the x- and y-position
          *get,y_pos,NODE,i_NNum,loc,y                 ! of each node listed in array
          cmsel,s,fixnodes_cell                       ! SELECT BEAM and CELL Nodes
          cmsel,a,fixnodes_sealing                     ! Nodes Bottom of SEALING
          nsel,r,loc,x,x_pos                           ! and select all nodes located
          nsel,r,loc,y,y_pos                           ! above these nodes
          cp,next,ux,all                               ! create coupled sets for selected nodes
          cp,next,uy,all
          cp,next,rotz,all

          cmsel,s,fixnodes_cell
          nsel,r,loc,z,offset                           ! select nodes on location (BEAM/CELL-Bottom - Nodes)

          *GET,i_NNum,NODE,i_NNum,NXTH
      *enddo

      cmsel,s,fixnodes_cell                           ! Nodes BEAM and CELL-Bottom
      cmsel,a,fixnodes_sealing                       ! Nodes Bottom of SEALING
      D,all,uz                                         ! constrain nodes
      D,all,ROTX
      D,all,ROTY

      lsel,s,line,,num_hinges*4                      ! Line 1 (upper left) from BEAM/CELL-Bottom
      nsll,s,0                                         ! select nodes from lines
      D,all,all                                         ! fix selected nodes

```

```

! ---- 2.) LOADS ----

rot_steps      =      1                      ! Number of pressure steps

rot_max        =      15/180*pi              ! maximum deformation of cell walls in degree
drotz          =      rot_max/rot_steps
rot_now        =      0

*do,i,1,rot_steps+1
    esel,s,type,,3                          ! select sealing elements
    sfe,all,1,pres,,p_def                   ! pressurize all selected elements
    allsel,all

    lsel,s,line,,num_hinges+1               ! Line 2 (upper left) from BEAM/CELL-Bottom
    nsll,s,0                                ! select nodes from lines
    D,all,rotz,-rot_now                     ! rotate selected nodes
    allsel,all

    lsel,s,line,,num_hinges+4               ! Line 5 (upper left) from BEAM/CELL-Bottom
    nsll,s,0                                ! select nodes from lines
    D,all,rotz,rot_now                      ! rotate selected nodes
    allsel,all

    solve

    rot_now = rot_now + drotz
*enddo

/eof                                          ! end of file

```

C13 – Quellcode (GET_MOMENT.mac)

```

! ---- post Macro ----
!-----
! ---- arguments: none -----

!-----
!- macro for extraction of moment values
!- to text file for each cell side -----
!-----

finish
/post1

lsel,s,line,,num_hinges+1
nsll,s,0
*get,num_nodes,nodes,0,count                ! count selected elements
*del,node_array,,nopr
*dim,node_array,array,num_nodes,1          ! create array with space for each element

*cfopen,strcat(arg1,'_moment'),txt
*cfwrite,'File',arg1
*cfwrite,'Esize',Esize1
*cfwrite,'nodes',num_nodes                  ! write to text file
*cfwrite,'Emodul',E_modul,MPa
*cfwrite,'thickness',thk_testcell,mm
*cfwrite,'pressure',p_def,MPa

*cfwrite,,
*cfwrite,'left',sub,rotation,Sum,min,max

```

```

num_substeps = 0
*do,i_step,2,rot_steps+1
    set,i_step,last
    *get,curr_substeps,active,0,solu,ncmss
    num_substeps = num_substeps + curr_substeps
*enddo

set,1,last
*do,i_sub,1,num_substeps
    set,next
    lsel,s,line,,num_hinges+1
    nsl1,s,0
    *get,node_aktuell,node,0,num,min                ! get minimum element number in set
    *get,node_rotz,node,node_aktuell,rot,z
    *do,i_node,1,num_nodes
        *get,node_aktuell,node,0,num,min                ! get minimum element number in set
        *get,node_moment,node,node_aktuell,rf,mz        ! get energy from element
        node_array(i_node,1) = node_moment              ! write energy to array
        nsel,u,node,,node_aktuell                      ! unselect present element
    *enddo
    allsel,all

    *vscfun,node_array_max,max,node_array              ! array operation (maximum)
    *vscfun,node_array_min,min,node_array              ! array operation (minimum)
    *vscfun,node_array_sum,sum,node_array              ! array operation (sum)

    *cfwrite,,i_sub,-node_rotz*180/PI,node_array_sum/1000,node_array_max/1000,node_array_min/1000
*enddo

*cfwrite,,
*cfwrite,'right',sub,rotation,Sum,min,max

set,1,last
*do,i_sub,1,num_substeps
    set,next
    lsel,s,line,,num_hinges+4
    nsl1,s,0
    *get,node_aktuell,node,0,num,min                ! get minimum element number in set
    *get,node_rotz,node,node_aktuell,rot,z
    *do,i_node,1,num_nodes
        *get,node_aktuell,node,0,num,min                ! get minimum element number in set
        *get,node_moment,node,node_aktuell,rf,mz        ! get energy from element
        node_array(i_node,1) = node_moment              ! write energy to array
        nsel,u,node,,node_aktuell                      ! unselect present element
    *enddo
    allsel,all

    *vscfun,node_array_max,max,node_array              ! array operation (maximum)
    *vscfun,node_array_min,min,node_array              ! array operation (minimum)
    *vscfun,node_array_sum,sum,node_array              ! array operation (sum)

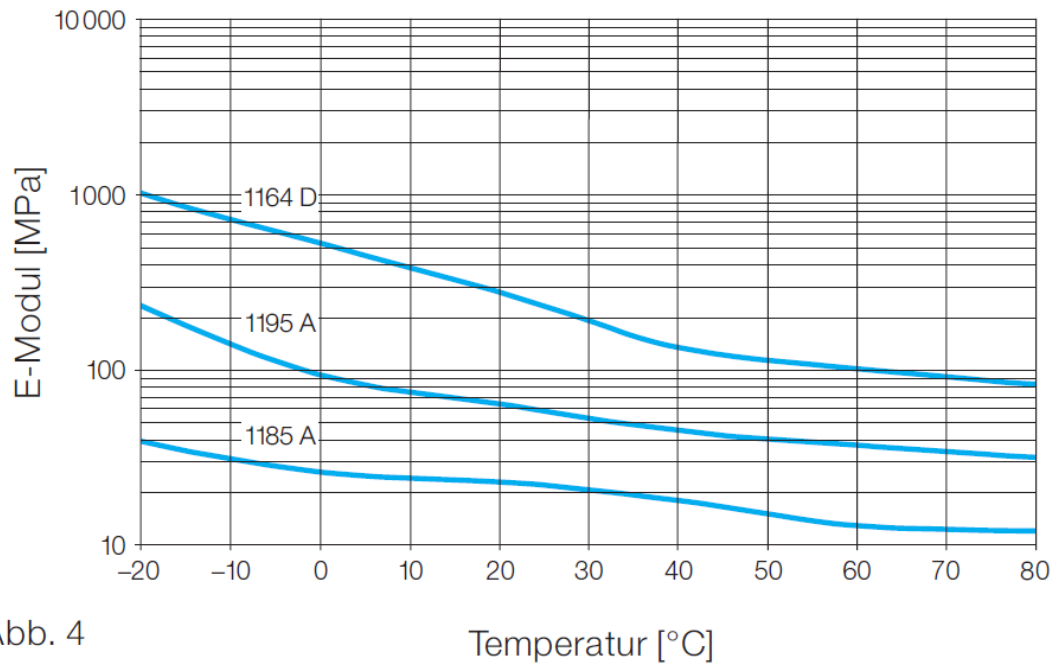
    *cfwrite,,i_sub,node_rotz*180/PI,-node_array_sum/1000,-node_array_max/1000,-
node_array_min/1000
*enddo

*cfclos
set,last

/solu

/eof
! end of file

```

D – Datenblätter Elastollan 1195 A aus [12]**E-Modul in Abhängigkeit von der Temperatur
Elastollan Polyether-Typen****Zugfestigkeit****Elastollan 1195 A**